



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**PŘÍPRAVA MULTIMATERIÁLOVÝCH STRUKTUR ZA
POUŽITÍ DEPOZIČNÍCH METOD**

MULTIMATERIAL STRUCTURES PREPARATION BY USING DEPOSITION METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Hana Novotná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Studentka: **Bc. Hana Novotná**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Řehořek, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Příprava multimateriálových struktur za použití depozičních metod

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studená kinetická depozice představuje progresivní metodu tvorby povrchů za použití práškových kovových materiálů, může však být použita i k cílené přípravě objemových materiálů. Diplomová práce je zaměřena na zvládnutí postupů přípravy takových materiálů, se zaměřením na tvorbu vnitřně strukturovaných multimateriálů. Základním principem jejich tvorby je využití výztuže z kovu s vyšší tuhostí v kovové matici s nižší tuhostí s tím, že výsledné vlastnosti ovlivňují obě komponenty podobně jako u kompozitů. Diplomant bude vyhodnocovat mikrostruktury připravených vzorků se zaměřením na kvalitu rozhraní a vlastnosti materiálů v jeho blízkosti. Dále bude vyhodnocovat profily tvrdosti a podílet se na hodnocení vybraných mechanických vlastností.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je připravit materiál s vnitřní architekturou za použití studené kinetické depozice a provést vyhodnocení jeho struktury a vybraných vlastností.

Seznam doporučené literatury:

MORIDI, A., S. M. HASSANI-GANGARAJ, M. GUAGLIANO and M. DAO. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. Surface Engineering. 2014, 36(6), 369-395. DOI: 10.1179/1743294414Y.0000000270. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743294414Y.0000000270>

KHUN, N. W., A. W. Y. TAN, W. SUN and E. LIU. Effect of Heat Treatment Temperature on Microstructure and Mechanical and Tribological Properties of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Coatings. Tribology Transactions. 2016, -(), 1-10. DOI: 10.1080/10402004.2016.1244584. ISBN 10.1080/10402004.2016.1244584. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10402004.2016.1244584>

WONG, W., A. REZAEIAN, E. IRISSOU, J. G. LEGOUX and S. YUE. Cold Spray Characteristics of Commercially Pure Ti and Ti-6Al-4V. Advanced Materials Research. 2010, -(89-91), 639-644. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.89-91.639. ISSN 1662-8985. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMR.89-91.639>

LI, W.-Y., C. ZHANG, X. GUO, J. XU, C.-J. LI, H. LIAO, C. CODDET and K. A. KHOR. Ti and Ti-6Al-4V Coatings by Cold Spraying and Microstructure Modification by Heat Treatment. ADVANCED ENGINEERING MATERIALS. 2007, 9(5), 418–423. DOI: 10.1002/adem.200700022. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200700022>

BRIT, A. M., V. K. CHAMPAGNE, R. D. SISSON a D. APELIAN. Microstructural analysis of Ti–6Al–4V powder for cold gas dynamic spray applications. Advanced Powder Technology. 2015, 5(26), 1335-1347. ISBN 80-860-1357-X.

VILLAFUERTE, J., ed. Modern cold spray: materials, process, and applications. Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-16771-8.

PAPYRIN, A. N. Cold spray technology. London: Elsevier, 2007. ISBN 00-804-5155-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vznikem, strukturou a mechanickými vlastnostmi architektonického materiálu. Teoretická část se věnuje kompozitům a teorii architektonických materiálů. Dále je zde popsána technologie cold spray, která se používá na vytvoření sítě drážek v architektonickém materiálu. V experimentální části se zkoumá vliv geometrie a profilu drážek na mechanické vlastnosti vzniklého architektonického materiálu. Zkoumána byla i mikrostruktura a tvrdost vzorků.

Abstract

This master's thesis deals with origin, structure and mechanical properties of architected material. The theoretical part deals with composites and theory of architected materials. Further, the cold spray technology is described and it is used to create the network of grooves in the architected material. In the experimental part the influence of groove geometry and profile on the mechanical properties of the resulting architected material is researched. Microstructure and hardness of the samples were also examined.

Klíčová slova

Cold spray, kompozit, architektonický materiál, mřížka, výztuž

Key words

Cold spray, composit, architected material, network, reinforcement

Bibliografická citace

NOVOTNÁ, Hana. *Příprava multimateriálových struktur za použití depozičních metod* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117703>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Lukáš Řehořek.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Řehořka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Bc. Hana Novotná

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Lukáši Řehořkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat všem, se kterými jsem spolupracovala v průběhu celé práce.

Obsah

1	Úvod	12
2	Teoretická část	13
2.1	Kompozity	13
2.1.1	Matrice	13
2.1.2	Výztuž	14
2.1.3	Částečné kompozity	15
2.1.4	Vláknové kompozity	15
2.1.5	Kompozity s kovovou maticí	16
2.2	Výroba kompozitů	17
2.2.1	Výroba vláknových kompozitů	18
2.2.2	Výroba částečných kompozitů	21
2.3	Porušení kompozitů	22
2.4	Zpracování kompozitů	23
2.5	Architektonický materiál	24
2.6	Cold spray	26
2.6.1	Princip technologie cold spray	27
2.6.2	Prášek a jeho výroba	31
2.6.3	Vlastnosti nástřiku	34
3	Experimentální část	37
3.1	Geometrie drážek	37
3.1.1	Měření tvrdosti	38
3.1.2	Provedení tahové zkoušky	39
3.2	První experiment	39
3.2.1	Struktura a rozhraní	40
3.2.2	Měření tvrdosti	44

3.3	Druhý experiment	47
3.3.1	Chemická analýza rozhraní	48
3.3.2	Struktura a rozhraní	50
3.3.3	Tahové zkoušky	53
3.3.4	Měření tvrdosti	63
3.4	Třetí experiment.....	67
3.4.1	Struktura a rozhraní	69
3.4.2	Tahové zkoušky	72
3.4.3	Měření tvrdosti	76
3.5	Porozita vzorků	78
4	Diskuze výsledků.....	80
5	Závěr.....	87
6	Seznam použité literatury	88
7	Seznam použitých zkratk a symbolů	91
8	Seznam obrázků a tabulek	92

1 ÚVOD

Lidstvo používá slitiny kovů několik staletí. Postupem času se v průmyslu začaly používat materiály jako technická keramika, polymery, speciální a legované slitiny a v posledním století se začaly více vyskytovat kompozity. Inženýři zjistili, že kombinací různých materiálů a výztuže, lze získat materiál s výbornými vlastnostmi. Během výzkumů kompozitů vědci našli inspiraci v přírodě a došli ke zjištění, že ke zlepšení vlastností materiálů stačí vhodně vytvořit architekturu materiálů. Výsledkem byl vznik architektonických materiálů, které kombinují materiály s odlišnými vlastnostmi vhodně uspořádané do geometrických útvarů, čímž vznikl materiál s novými vlastnostmi. Tyto nové materiály jsou stále zkoumány a navrhovány, protože myšlenka vytvoření architektonických materiálů je poměrně mladá.

Výzkumem architektonického materiálu se zabývá také tato práce. Pro tento výzkum byly vybrány známé a snadno dostupné materiály, kterými jsou železo a hliník. Cílem bylo měkký hliník vyztuzit železem za účelem získat materiál podobných vlastností jako titan. Pokrokovou myšlenkou bylo zjištění, co se stane s výsledným materiálem a jeho vlastnostmi, když se použije nová technologie cold spray pro nanášení železa. Byly navrženy tři geometrie drážek (čtvercová, sinusová a trojúhelníková), které by takového výsledku byly schopny dosáhnout. Jako profil drážky byl nejdříve zvolen nejjednodušší čtvercový tvar, který lze frézovat do hliníkové destičky sloužící jako substrát. Po vytvoření architektonického materiálu se zkoumaly jeho mechanické vlastnosti a ověřovalo se, zda se vlastnosti nově vzniklého materiálu podobají vlastnostem titanu.

Výsledky nebyly pozitivní a z tohoto důvodu se hledalo lepší řešení a důvod neúspěchu. Navrhla se lichoběžníková drážka a pokus byl proveden znovu na všech třech geometriích drážek. Výsledky byly pozitivnější již po prvním vyhodnocení mikrostruktury, a proto se přistoupilo k vyhodnocení mechanických vlastností z tahových zkoušek vzorků. Výsledné hodnoty se bohužel neblížily hodnotám titanu, ale rozhraní hliníku a železa bylo kvalitnější než v přechodném pokusu.

Další pokrokovou myšlenkou bylo použití technologie cold spray u obou použitých materiálů, čímž vznikl vzorek třetího experimentu. Hliníkový substrát byl vytvořen z čistého hliníku, geometrie drážky se vyrobila pomocí mřížky, přes kterou byl nanesen hliník. V konečné fázi se nastříkala vrstva železa. Rozhraní hliníku a železa v tomto pokusu bylo kvalitní, a proto se přistoupilo k tahovým zkouškám. Bylo možné porovnat výsledky druhého a třetího experimentu, protože byly použity stejné materiály (jako substrát čistý hliník- 99,5 % a čisté železo- 99 %). Na základě negativních výsledků z prvního experimentu byla práce následně zaměřena na druhý a třetí experiment.

U všech experimentů se měřila také porozita nástřiků, protože cold spray se vyznačuje nízkou porozitou nástřiku. Posledním krokem bylo zjištění, zda železem vyztuzený hliník (oba materiály nastříkány technologií cold spray) má lepší mechanické vlastnosti než samotný hliník vytvořený technologií cold spray.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozity

Kompozit je materiál, který se skládá z alespoň dvou různých typů fází, jejichž kombinací lze dosáhnout zlepšení vlastností, než kdyby se jednotlivé fáze vyskytovaly samostatně. Fáze musí být od sebe snadno rozlišitelné a často mají velmi odlišné složení.

Jedna část kompozitu se nazývá výztuha. Jedná se o jednu nebo více nespojitých fází, které se mohou vyskytovat ve spojitě fázi zvané matrice (druhá část kompozitu). Matrice bývá často houževnatá a méně pevná, proto se vyztuží částicemi nebo vlákny o různé velikosti či délce a průměru. Zpravidla se jedná o částice nebo vlákna vysokopevné nebo tvrdé. Množství výztuže musí být minimálně 5 % [13].

V důsledku různých kombinací typu materiálu matrice a vyztužujících částic lze zvýšit mechanické vlastnosti, například pevnost, tuhost, vysokoteplotní odolnost, korozní odolnost a jiné. Kompozity se také aplikují i v extrémně namáhaných částech strojů.

Kombinace matrice a výztuže se musí volit tak, aby nedocházelo k chemické interakci mezi těmito dvěma materiály a nevznikala křehká intermetalická fáze, která by mohla snížit mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu je důležité rozhraní matrice-výztuž, které má mít dobrou soudržnost a na kterém probíhá minimální množství chemických reakcí mezi těmito dvěma částmi. Ideálním stavem je výborná koheze bez vzniku křehkých fází.

Jedna z charakteristických vlastností kompozitu je synergismus. To znamená, že vlastnosti vzniklého kompozitu jsou výrazně lepší, než kdyby se sečetly hodnoty jednotlivých složek. Díky této vlastnosti mohou vznikat nové materiály s novými vlastnostmi [2, 13].

2.1.1 Matrice

Jako materiál pro matrici se může použít kov, keramika nebo polymer. Matrice převážně slouží k přenosu vnějšího zatížení na výztuž. Matrice nemusí být pouze z čistého prvku, ale lze použít i různé slitiny, obsahující dva nebo více prvků v různém poměru.

Každý typ matrice má různé vlastnosti:

- kovová matrice – výborná elektrická a tepelná vodivost, pevnost a tvárnost ke zpomalení šíření trhliny, odolnost proti opotřebení a možnost různých povrchových úprav (např. povlakování), převážně se jako matrice používají slitiny kovů,
- keramická matrice – aplikace v místech vysokých teplot díky vysoké pevnosti, odolnosti vůči creepu a oxidaci, tvrdé ale křehké,
- polymerní matrice – termosplasty nebo reaktoplasty, rozdílný způsob výroby a široké spektrum vlastností v závislosti na použitém polymeru.

Matrice, která obklopuje vlákna, také slouží k jejich ochraně proti korozi, oxidaci nebo mechanickému poškození např. při poškrábání nebo při pádu. Na matici působí vnější prostředí, které může způsobit její degradaci, úbytek materiálu a nesoudržnost. Při velkém poškození může dojít k rozpadu matrice a kompozit se stává nesoudržným, ztrácí své vlastnosti a stává se nepoužitelným [1, 3].

2.1.2 Výztuž

Jako vyztužující materiál lze použít kov, keramiku, skleněné částice, whiskery či polymer o různých rozměrech. Pro výztuž je charakteristická vysoká pevnost a modul pružnosti, protože většina zatížení působící na kompozit je přenášena maticí na výztuž, která musí vydržet dané zatížení určené aplikací.

Velikost, množství, rozměry a tvar zpevňující fáze mají značný vliv na konečné vlastnosti kompozitu, proto je nutné výztuž specifikovat z důvodu lepšího popisu kompozitu (viz Obr. 1).

Dělí se na tři hlavní typy:

- částicové (partikulární),
- vláknové,
- disperzní.

Částice mohou mít různý tvar, nejčastěji se vyskytují s pravidelným tvarem (kulovitý či destičkovitý). Jako výztuž se lze použít kombinací různých tvarů a velikostí zpevňující fáze.

Charakteristikou vláknových částic je, že jejich délka je výrazně větší než jejich průměr nebo šířka. Vyskytují se dlouhá vlákna, která jsou často uspořádaná, nebo krátká vlákna, náhodně orientovaná nebo částečně uspořádaná. Krátká vlákna se vyrábějí rovnou o dané délce nebo se zhotovují z vláken dlouhých metodou mletí či sekání [1, 2].

V kompozitu je důležité množství, orientace a rovnoměrnost uložení zpevňující fáze. Při nerovnoměrném rozložení částic dochází k výrazné anizotropii. To znamená, že materiál má v různém směru namáhání rozdílné vlastnosti, především pevnost [1, 2].



Obr. 1 Typy kompozitů [24]

Disperzní zpevnění lze považovat za částicové, ale jeho speciální charakteristikou je velikost částic, která je menší než $0,1 \mu\text{m}$, jejich vzdálenost je max. $0,3 \mu\text{m}$ a objemové koncentrace je až 15 %. Výztuže jsou velmi jemné částice, většinou z inertního materiálu vůči matici, tvrdé a teplotně stálé. Z těchto důvodů se používají nejčastěji oxidy nebo se přidávají částice kovové či nekovové. Tyto drobné submikronové částice zpomalují pohyb dislokací, které je musí obejít nebo protnout [1, 3].

2.1.3 Částicové kompozity

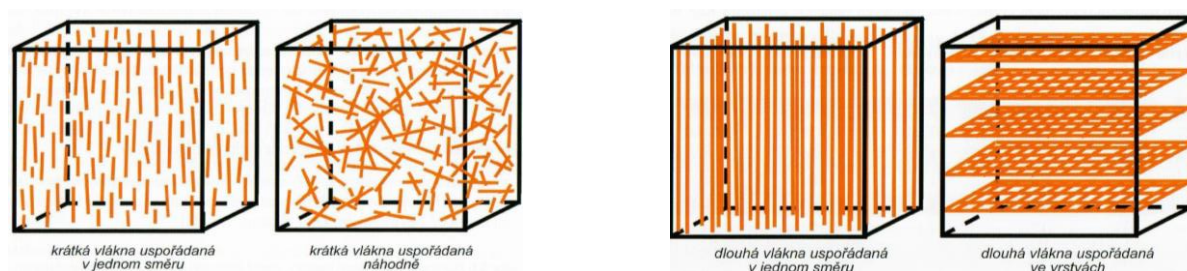
Částice jsou pravidelného či nepravidelného tvaru ale přibližně rovnoosé. Zvyšují především tuhost matrice než tahovou pevnost. Volbou vhodného tvaru lze zlepšit obrobitelnost daného materiálu, povrchovou tvrdost, odolnost proti opotřebení nebo tepelné vlastnosti, např. tepelnou vodivost a chování za zvýšených teplot [1, 3].

2.1.4 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity (viz Obr. 2) mají v praxi větší důležitost než částicové. To díky pevnosti a tuhosti vláken. Pevnost vláken je ovlivněna několika faktory:

- výskyt a velikost defektů (dutinky, mikrotrhliny),
- orientace defektů.

Pevnost je vyšší, čím menší je množství defektů. Čím menší je průměr vlákna, tím je méně defektů. Vliv defektů je menší, jestliže jejich orientace je ve směru vláken než kolmo k ose. [2]



Obr. 2 Typy uspořádání vláken [2]

U vláknových kompozitů lze snadno spočítat teoretický modul pružnosti jak ve směru vláken, tak i kolmo na vlákna.

Objemový podíl matrice (V_m) a vláken (V_f) je dán vztahem (1):

$$V_m + V_f = 1 \quad (1)$$

Modul pružnosti ve směru vláken výsledného kompozitu (E_c) lze vyjádřit vzorcem (2), kde E_m je modul pružnosti matrice a E_f je modul pružnosti vláken:

$$E_{c\parallel} = E_m V_m + E_f V_f \quad (2)$$

Modul pružnosti kolmo na vlákna lze vypočítat následně podle rovnice (3):

$$E_{c\perp} = \left(\frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \right)^{-1} \quad (3)$$

Všechny tyto vzorce platí pro kompozity s dlouhými vlákny [1, 9, 13].

2.1.5 Kompozity s kovovou maticí

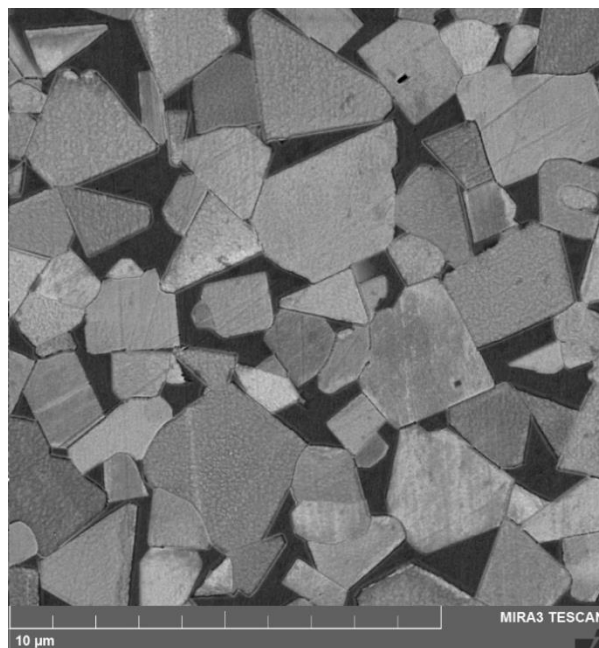
Názvem kovový kompozit lze označit typ kompozitu, kde kovová matrice je vyztužena kovovými částicemi nebo častěji kovovými vlákny, případně karbidy a nitridy kovů.

Kovová vlákna je výhodné použít díky nízkým výrobním nákladům a dobré dostupnosti. Nevýhodou je jejich vyšší měrná hmotnost, zvyšující celkovou hmotnost kompozitu oproti původní nevyztužené matici.

Lehce tavitelné kovové matrice se nejčastěji vyztuží ocelovými vlákny. Používání této kombinace je omezeno teplotou, která nesmí přesáhnout 300 °C. Pokud je potřeba, aby kompozit vydržel vyšší teplotu, tak se matrice zpevní vlákny maraging, vysokolegované, vysokopevné a martenziticky vytvrditelné oceli.

Je-li potřeba vyztuzit žárovevné slitiny, využívá se vlastností wolframových či molybdenových vláken [1, 3].

Dalším kompozitem s kovovou maticí je slinutý karbid (viz Obr. 3). Matrice je tvořena kobaltem a jako zpevňující částice slouží karbidy nebo nitridy těžko tavitelných prvků, např. wolfram, molybden, titan. K výrobě tohoto kompozitu se využívá technologie slinování. Je to proces uskutečňovaný za vysokých teplot a tlaků. Směs se nejdříve slisuje do požadovaného tvaru. Vylisovaný polotovár se poté vloží do pece a následně slinuje. Výsledný výrobek má tvar výlisku, ale je menší, protože u slinování dochází ke smrštění o několik desítek procent (u slinování obecně záleží na typu matrice, kvalitě slisování a množství pórů). Vzniklý kompozit je velmi tvrdý, odolný vysokým teplotám a špatně obrobitelný, proto se lisuje do požadovaného tvaru. Používá se například k obrábění dílů jako břitová destička. Slinutý karbid je kompozit, ve kterém se nachází více chemicky rozdílných zpevňujících částic (různé typy karbidů a nitridů). Kompozitem s kovovou maticí lze nazvat také ODS oceli. Jedná se o oceli zpevněné oxidickou disperzí. Matrice bývá buď feriticko-martenzitická nebo feritická a je legovaná Cr, Mo, Ti, a W. Homogenní disperzní částice jsou z oxidů Y_2O_3 nebo TiO_2 . Tyto ocele se využívají například v jaderném průmyslu. [1, 3, 4].



Obr. 3 Struktura slinutého karbidu [35]

2.2 Výroba kompozitů

Výroba kompozitů je složitý proces, při kterém se hlídá několik aspektů. Polymerní matrice musí mít vhodnou viskozitu a při tuhnutí se hlídá nežádoucí pórovitost. Při slinování kovových a keramických matric se musí správně nastavit podmínky slinování, aby se vyrobil kvalitní kompozit. Jiný problém je u vláknových kompozitů, kde se musí dbát na vkládání vláken do matrice, aby nedošlo k jejich poničení při nevhodné a neodborné manipulaci (poškození povrchu vláken může vést ke ztrátě jejich vlastností a kompozit nebude mít předpokládané vlastnosti). Vlákná lze také znehodnotit jejich stykem (dvou nebo více) a následném vzniku tření mezi nimi. Citlivější na poškození jsou převážně nekovová např. vlákna skleněná, keramická, borová a další. Vkládání vláken do tekuté matrice nese další úskalí. Může docházet k difuzi, reakci a vzniku nežádoucích složek na rozhraní matrice-výztuž. Z tohoto důvodu se upřednostňuje výroba kompozitů v tuhém stavu, především u kovových matric. U částicových kompozitů se hlídá sedimentace částic. Při sedimentaci se směs stává nehomogenní a dochází k anizotropii materiálu. Pokud je ale vyžadován kompozit o proměnlivých vlastnostech, tak se využívá právě sedimentace. Tato metoda se uplatňuje například ve stavebnictví u litých podlah, kde se několik jednotlivých vrstev nemusí nanášet samostatně. Jedna vytvořená směs se vylije na podlahu, směs sedimentuje a vytváří plynule proměnlivé složení. Na povrchu se nachází pouze matrice, která má funkci krycí a dekorační [3].

Metody výroby kompozitů se dají rozdělit podle stavu matrice při výrobě na:

- kompozity s matricí v tuhém stavu (lisování, slinování),
- kompozity s matricí v tekutém stavu (odlévání).

V této práci jsou metody výroby rozděleny podle typu kompozitu:

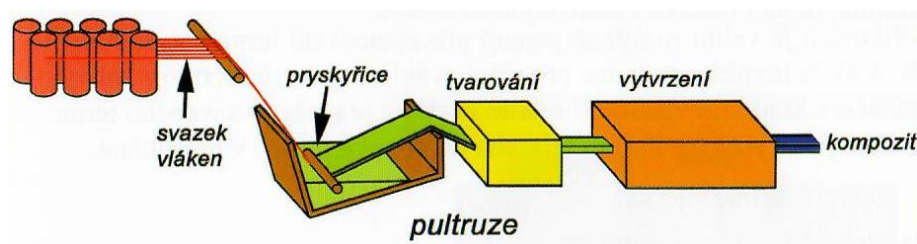
- výroba vláknových kompozitů,
- výroba částicových kompozitů.

2.2.1 Výroba vláknových kompozitů

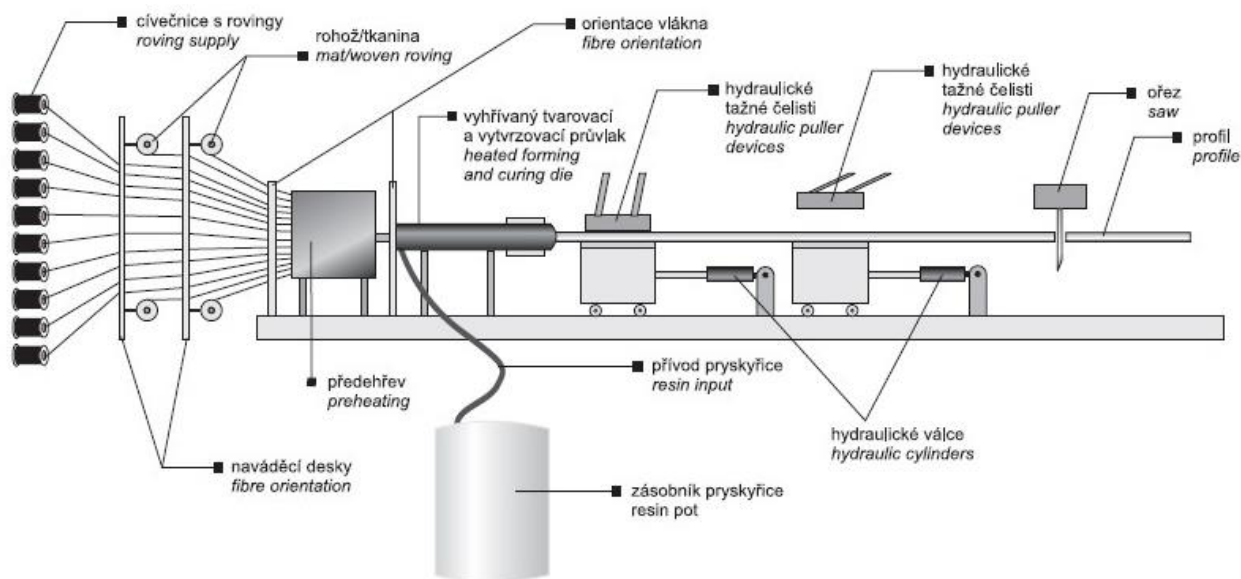
K výrobě vláknových kompozitů se využívají různé metody, mezi nejčastější patří:

- pultruze,
- navíjení,
- vstřikování,
- lisování,
- válcování,
- infiltrace,
- explozivní tváření,
- plazmový nástřik,
- elektrolytické nanášení matrice.

Pultruze se převážně aplikuje na výrobu polymerních kompozitů, nejčastěji z reaktoplastu (viz Obr. 4). Svazek několika vláken se nejdříve smáčí v roztaveném polymeru, který obalí jednotlivá vlákna, a tak vznikne polotovár. Ten pokračuje do další části výrobní linky, kde dochází k tvarování. Kvůli stálému tvaru konečného výrobku se musí polymer vytvrdit. Podmínky vytvrzování závisí na použitém polymeru. Touto metodou se nejčastěji vyrábějí tyče, pásy a hranoly (viz Obr. 5). Matricí nemusí být pouze roztavený polymer, ale může ji tvořit i roztavený kov či slitina. Vlákna se smočí v lázni kovu, který vytvoří tenkou vrstvu. Dále je možnost využít lisování k výrobě složených kompozitů. Matricí v převážné většině aplikací představuje hliník nebo měď. Pultruze se převážně uplatňuje ve stavebnictví pro výrobu výztuží do betonu [1, 2, 13].

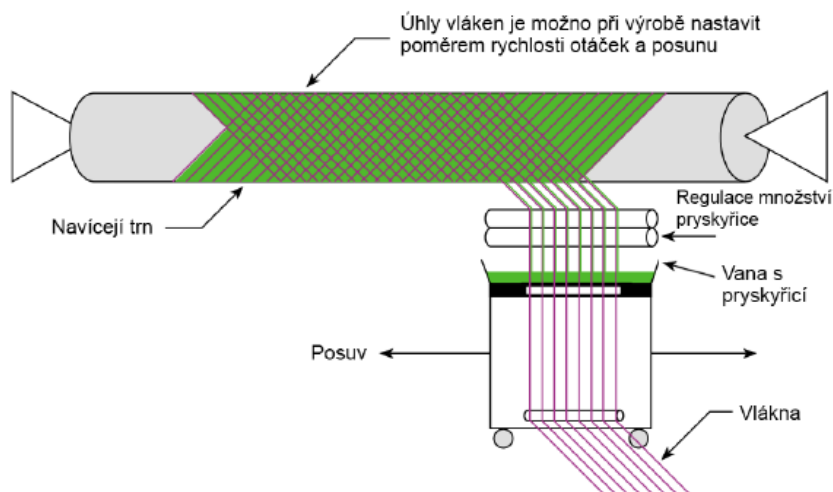


Obr. 4 Zjednodušené schéma pultruze [2]



Obr. 5 Schéma pultruze [23]

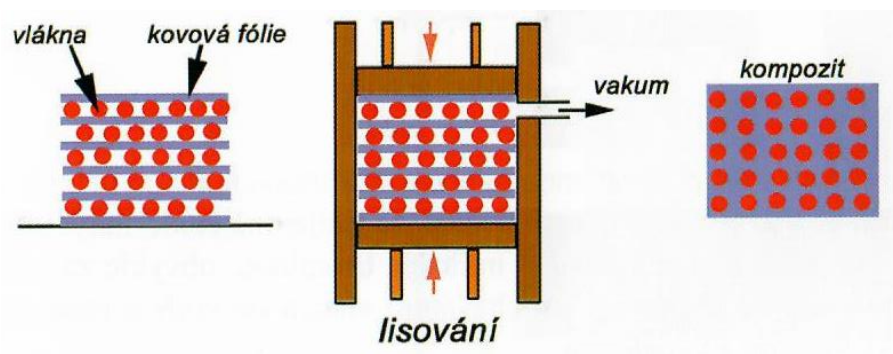
Navíjení je podobné pultruzi, ale tímto postupem lze vyrábět duté kompozity s polymerní matricí, např. trubky. Vlákn se smočí v roztaveném polymeru a namotávají se na model, který reprezentuje konečný tvar výrobku (viz Obr. 6). Dále následuje vytvrzení a proces je u konce. Navíjením se vyrábějí nádrže, potrubí nebo kabiny vagónů. Dále je tato metoda rozšířená ve zbrojním průmyslu pro výrobu raket a jejich příslušenství [13].



Obr. 6 Technologie navíjení [1]

Vstřikování je další metodou používanou pro výrobu kompozitů, které jsou vyztuženy krátkými vlákny a nejčastěji s polymerní matricí. Směs tekuté matrice a krátkých vláken je vstřikovaná pod tlakem do kovové formy. Výrobek chladne a tuhne ve formě [1, 13].

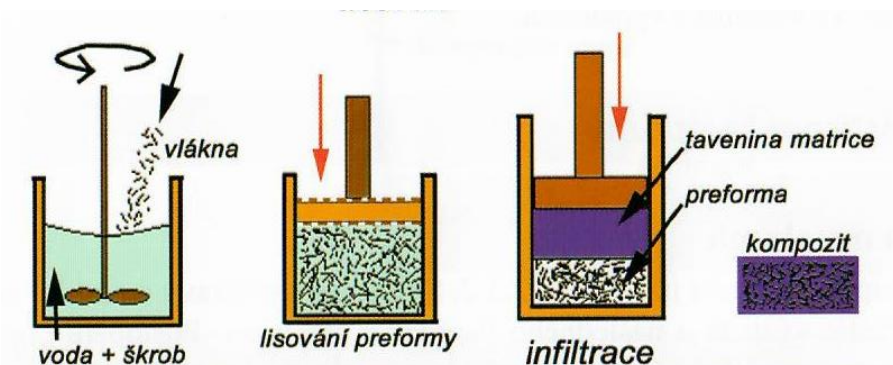
Lisování za tepla je výhodné použít u kovových matic s dlouhými vlákny. Tento postup výroby uplatňuje výhody střídání vrstev tenkých kovových fólií a vláken (viz Obr. 7). Matrice je tedy v pevném stavu ve formě fólií. Ke spojení kompozitu dochází lisováním za zvýšených teplot [1, 2, 13].



Obr. 7 Výroba kompozitů lisováním [2]

Válcování za tepla je podobný proces jako lisování, je rychlejší, ale dochází k větší plastické deformaci matrice. Podle typu materiálu jsou u válcování často vysoké teploty (W – vlákno až 1 200 °C) [1, 2].

Infiltrace je složitější postup výroby kompozitu, protože se nejdříve musí vyhotovit preforma. Ta vznikne smícháním krátkých vláken a vody se škrobem. Směs se vylisuje, vysuší a vypálí (odstraní se voda a škrob). Tímto postupem vznikne porézní preforma, kterou tvoří pouze krátká vlákna. Následuje infiltrace, kdy roztavená kovová matrice zaplní póry v preformě (viz Obr. 8). Také se využívá smáčivosti obou složek, ale v tomto případě se musí pracovat ve vakuu, aby nedošlo k oxidaci roztavené matrice [2].



Obr. 8 Schéma výroby kompozitů infiltrací [2]

Explozivní tváření umožňuje zkrátit proces výroby. Nedochozí k interakci výztuž-matice a vzniku intermetalické fáze. Matrice je ve formě fólií a dochází ke střídání vrstev fólií a vláken. Aplikace výbušniny na vrchní vrstvu a její iniciací vzniká rázová vlna, která vyvolá rychlou deformaci [1, 2].

Plazmový nástřik kombinuje jak matici v tuhém stavu ve formě fólie, tak v tekutém stavu ve formě nástřiku. Nástřik se provádí na připravený válec s výztuží. Válec se obalí kovovou fólií, poté se na něj namotá vlákno. Následně se vloží do komory s ochrannou atmosférou

z argonu, kde se provádí nástřik. Následuje nástřik matrice, která má většinou stejné složení jako podkladová fólie (ve výjimečných případech může mít odlišné složení). Účelem nástřiku je obalení vlákna a uchycení na fólii. Nevýhodou této metody je pórovitost nástřiku [1, 13].

Elektrolytické nanášení je upřednostněno u kompozitů s matricí z čistých prvků, slitiny touto metodou nanášet nelze. Metoda se osvědčila hlavně při výrobě Ni matrice – B vlákno, Ni matrice – C vlákno nebo Cu matrice – W vlákno. Válec ponořený do elektrolytu představuje katodu, čistý kov tvořící matici ve finálním kompozitu je anoda. Na válec se navíjí vlákno a zároveň se elektrolyticky nanáší kov. Tato metoda není energeticky náročná [1, 13].

2.2.2 Výroba částicových kompozitů

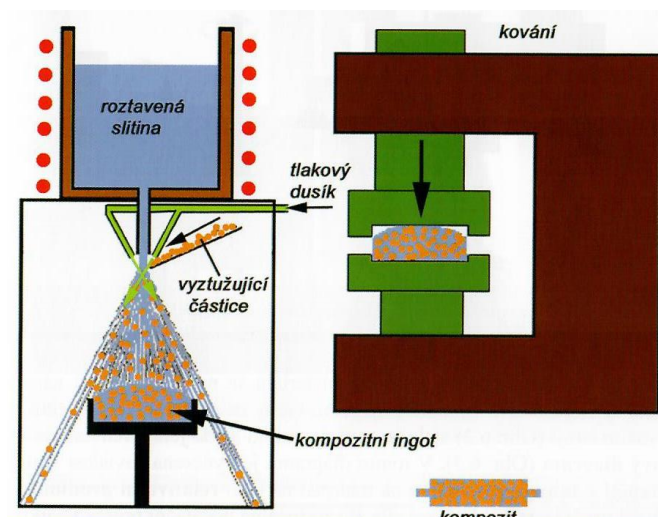
Částicové kompozity lze vyrobit některou z následujících metod:

- prášková metalurgie (slinování),
- odlévání,
- nástřik směsi.

Proces slinování je složitý a vyžaduje důkladnou přípravu jak částic výztuže, tak matrice, aby došlo ke dobrému spojení těchto dvou fází. Nejvíce se využívá u těžkovitelných kovů a slitin nebo u částic z keramiky či karbidů a nitridů.

Odlévání zahrnuje roztavení matrice (většinou kovové), vmíchání částic (teplota musí být taková, aby nedošlo k roztavení částic) a následné nalití směsi do forem. Tekutá směs se musí míchat, aby došlo k homogenizaci a částice nesedimentovaly. Typy formy se mohou lišit dle požadovaného tvaru a přesnosti rozměrů. Odlévat se může do kovových forem (vícekrát využitelné) nebo přesné lití s využitím voskového modelu do keramických forem (na jedno použití) [2].

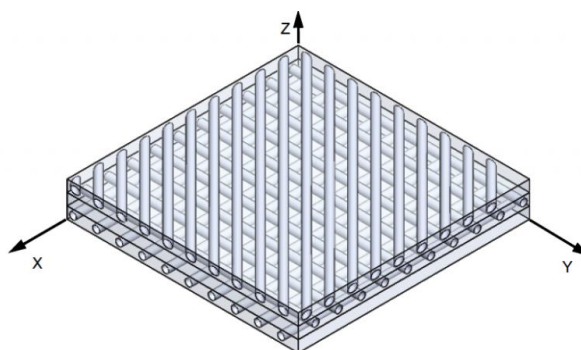
Produktem nástřiku je kompozitní ingot. Tato metoda nástřiku je aplikována převážně u hliníkových matric. Spočívá v rozstříkávání roztavené matrice pomocí trysek, kterými proudí pod tlakem plyn, např. inertní dusík. Ve stejnou chvíli je výztuž nepřetržitě přiváděna k tryškám a tavenině, kde dochází k jejich rozptýlení. Směs drobných kapek taveniny a výztuže dopadá na podklad a tím dochází k rychlému tuhnutí směsi a vzniku ingotu (viz Obr. 9). Tento polotovár se dále zpracovává do požadovaného tvaru, např. kování, lisováním, obráběním nebo jinými metodami [2].



Obr. 9 Technologie nástřiku kompozitů [2]

2.3 Porušení kompozitů

Jak již bylo zmíněno, většina kompozitů se vyznačuje anizotropií. Směr namáhání má vliv také na typ porušení. Ke snížení vlivu anizotropie je snaha vyrobit kompozit s různou orientací vláken nebo vrstvených, tzn. že kompozit je tvořen vrstvami, které jsou vůči sobě pootočený (viz Obr. 10).



Obr. 10 Uložení vláken v kompozitu [26]

Při namáhání vláknového kompozitu ve směru vláken se trhliny mohou šířit:

- podél vláken,
- napříč vlákny.

Podélné trhliny se ve většině případů tvoří a šíří v případě kompozitů, u kterých během výroby vznikla intermetalická fáze [1, 9].

Porušení kompozitů napříč vlákny je dvojího druhu podle typu matrice. Vytažení vláken z matrice po porušení značí křehkou matici nebo nedošlo k dokonalému spojení matrice a výztuže. U keramických kompozitů je naopak vytahování vláken žádoucí. V případě houževnaté matrice vzniká velmi členitý povrch a vlákna se nevytahují.

Zatížení kompozitu kolmo ke směru vláken má velký vliv na znehodnocení a dochází k rychlejšímu poškození kompozitu, protože zatížení přenáší pouze matrice. Pokud se v materiálu bude vyskytovat intermetalická fáze, tak k porušení dojde rychleji [1, 9].

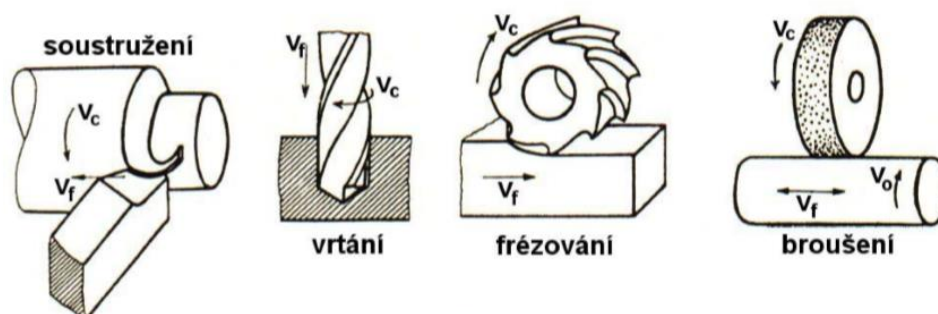
2.4 Zpracování kompozitů

Kompozity lze zpracovávat, obrábět či tvarovat stejnými způsoby jako by se jednalo o čisté materiály nebo slitiny. Ovšem při volbě operace se musí brát v potaz specifická struktura a různé vlastnosti matrice a výztuže. Dalším faktorem ovlivňující zpracování je množství a orientace vláken nebo částic. Při špatně zvolené metodě či podmínkách lze kompozit znehodnotit a poškodit.

Mezi nejčastější metody zpracování patří:

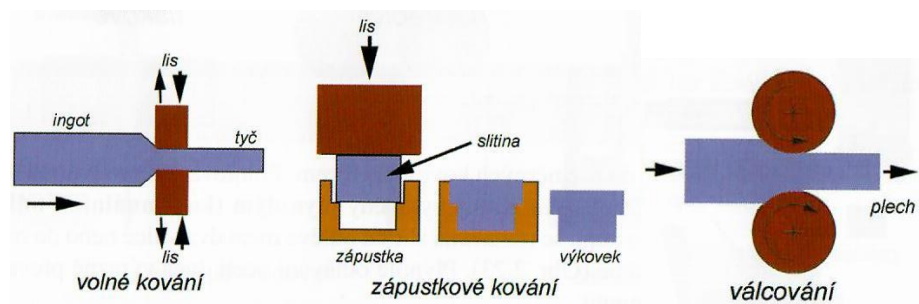
- obrábění,
- tváření,
- svařování, pájení,
- mechanické spojování.

K obrábění kompozitů se výhradně používají nástroje s diamantovými povrchy v důsledku nehomogenity, rozdílné tvrdosti, hustoty, odolnosti matrice-výztuž. Vrtání se provádí vrtáky s diamantovými hroty a u tloušťky materiálu větší než 3 mm se vrtání provádí s použitím chladicí kapaliny (viz Obr. 11) [1, 2].



Obr. 11 Typy obrábění [25]

Podmínky tváření se volí tak, aby nedocházelo k porušení matrice nebo výztuže. Důležitou a sledovanou vlastností při tomto procesu je plasticita jednotlivých materiálů. Obtížnost tváření také ovlivní množství a rozložení vyztužující fáze. Tváření za studena se řadí u kompozitů k obtížným technologiím zpracování (viz Obr. 12). U některých kompozitů lze použít pouze tváření za tepla, jedná se především o vícevrstvené kompozity s odlišnou orientací vláken nebo u křehkých matric. Mezi tváření se řadí i ohýbání, u kterého má orientace vláken výrazný vliv. Ohýbání za studena je umožněno jen u jednosměrně zpevněných kompozitů. Tato podmínka je ještě omezena ohybem ve směru vláken, a to jen o určitém poloměru ohybu (nelze dělat malé poloměry). Jednou z možností usnadnění ohybu je, že v předpokládaném místě ohybu se nevyskytují zpevňující vlákna.



Obr. 12 Technologie tváření – kování a válcování [2]

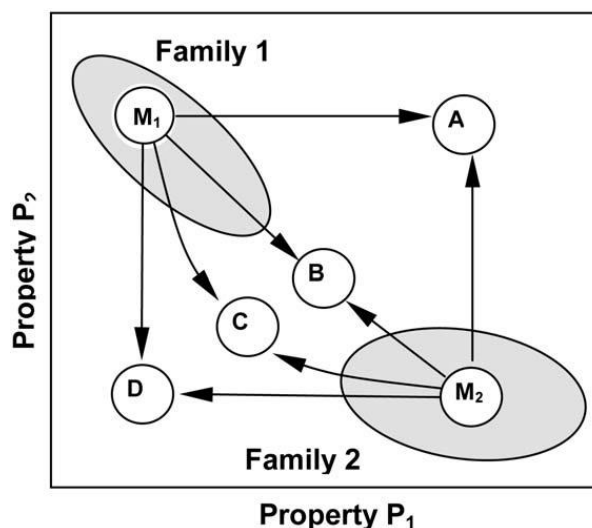
Existuje několik technologií svařování. Mezi nejrozšířenější patří difuzní nebo tavné svařování. Dnešní doba umožňuje i svařování plastů, takže se dají svařovat i kompozity s polymerní matricí. Ke spojení nesvařitelných kompozitů se dá využít pájení, kdy se použije fóliová pájka. Ta musí mít nižší teplotu tavení než spojované kompozity. Je kladen důraz na čistotu spojovaných ploch, jinak by pájka nemusela splnit svoji funkci spojovací vrstvy.

K mechanickému spojování se řadí šroubování, nýtování nebo spojování pomocí čepů. Do této skupiny patří také použití lepidel na různé bázi. Tyto metody se označují též jako rozebíratelné. Kompozity lze snadno oddělit bez velkého poškození nebo zásahu, ale u lepených spojů je poškození výraznější [1].

2.5 Architektonický materiál

Architektonický materiál je specifický v kombinaci různých materiálů a vyznačuje se jejich přesně danou geometrií. Je to kombinace umění a vědy v designu materiálu. Materiály se uspořádají tak, že výsledný materiál má lepší vlastnosti než samotné homogenní materiály a dochází tedy k synergii. Materiály se často liší ve vlastnostech jako pevnost, houževnatost a tuhost. K vytvoření geometrie se využívají alespoň dva materiály. Technologie jdou dopředu, rychle se vyvíjejí, a proto má výroba architektonických materiálů budoucnost [19, 20].

K vytvoření účelně fungujícího architektonického materiálu je nutné definovat nejenom geometrii, ale také její tvar, velikost a její spořádání (orientace v prostoru). Důležité je také zvolit správné materiály a jejich mikrostrukturu. Každá změna jednoho parametru může ovlivnit vlastnosti pozitivně nebo negativně. Geometrie se vyznačuje svojí pravidelností a také periodicitou. Důležitým faktorem v takovém materiálu je stupeň hierarchie (uspořádání), složitost geometrie a počet jejích os. Málokdy se v jednom tělese vyskytuje několik geometrií [19, 20].



Obr. 13 Předpoklad vlastností architektonického materiálu [22]

Cílem kombinací dvou materiálů o různých vlastnostech je vytvořit nový materiál, který kombinuje vlastnosti obou materiálů v žádoucím poměru. Předpoklad možných kombinací je na obrázku Obr. 13. Nejideálnějším případem je vznik materiálu s vlastnostmi v oblasti A, protože bere to „nejlepší z obou materiálů“. Oproti tomu nejhorším případem je oblast D, protože získaný materiál má ještě horší vlastnosti než materiály samostatně. Oblast B využívá pravidla směsi, kdy výsledné vlastnosti jsou většinou aritmetickým průměrem vlastností materiálů vážené jejich objemovou frakcí, tzn. že vlastnosti závisí na poměru materiálů. Oblast C také nalezne své uplatnění v některých aplikacích [22].

Inspirací pro výrobu architektonického materiálu byla příroda, kde se architektura materiálu vyskytuje velmi často, např. v kostech, zubech, ve skořápkách korýšů a v lasturách. Příroda vytvořila geometrie, které se člověk snaží napodobit a vyrobit. Příroda měla omezené množství materiálů, přesto potřebovala vytvořit různé vlastnosti těles, proto vznikla architektura materiálů. V tělech živočichů, schránkách a kostech je architektonický materiál tvořen převážně z keramiky a polymerů (přírodních). Důležitou funkcí v přírodě je také uzdravovací proces. Oproti tomu inženýrské materiály mají vysoké požadavky na tuhost, často se používají kovy nebo synteticky vyrobené keramiky a polymery bez uzdravovacího procesu, proto se zatím nedosáhlo tak výborných vlastností jako u přírodních architektonických materiálů [19, 20].

Od nových materiálů se čeká zlepšení strukturních vlastností. Je požadováno, aby byl tvrdší, lehčí, pevnější a také multifunkční (vhodný pro více aplikací). Všechny tyto požadavky je schopný splnit architektonický materiál, protože homogenní materiál není adekvátní pro tyto účely [19].

Podle rozměrů geometrie lze rozdělit architektonický materiál na:

- makroarchitektonický (např. architektura katedrál),
- mikroarchitektonický (např. pěny),
- nanoarchitektonický.

Architektonický materiál lze také rozdělit na:

- mřížový (fiber network),
- buněčný,
- duplexy a dvoufázové oceli.

Mřížový materiál je složen ze dvou nebo více pevných materiálů s periodickou geometrií (bez mezer a pórů), kdežto buněčný se skládá z pevného materiálu a vzduchu, díky tomu je porézní a lehký. K architektonickým materiálům se často také řadí duplexy a dvoufázové oceli. Navzdory ke zlepšeným vlastnostem je jejich využití limitováno z důvodu termodynamické nerovnováhy. Tyto materiály jsou nestabilní během tepelného nebo mechanického zatížení [20, 21].

Architektonický materiál kombinuje materiál houževnatý s křehkým a vzájemná geometrie obou fází výsledné uspořádání ještě zpevní. Díky inspiraci v přírodě probíhají různá modelování a optimalizace geometrií. Provádí se simulace struktur s kombinací materiálů, aby se zjistily vlastnosti architektonického materiálu. V případě dobrých výsledků ze simulace se přejde k výrobě. Cílem inženýrských architektonických materiálů je dosáhnout vysoké pevnosti a vysoké pružnosti. Porušení se řídí podle jiných pravidel než u slitin – trhliny se nešíří přes zrna nebo bloky, ale kopírují rozhraní geometrie [19, 20].

2.6 Cold spray

Cold spray (CS) je metoda, která se řadí mezi techniky termálního nástřiku (česky se metodě říká studená kinetická depozice). První zmínky o principu cold spraye pocházejí ze začátku 20. století z Ruska (patent z roku 1909, Thurston). Přístroj byl bez Lavalovy trysky a měl nízkou účinnost. Technologie se postupně zlepšovala a na konci 80. let 20. století byla patentována konstrukce, tak jak ji známe dneska a postupně se rozšířila do celého světa. Jedná se o poměrně novou technologii, která má nezanedbatelný význam v některých odvětvích průmyslu. Využívá se především ve vojenském a automobilovém průmyslu, letectví, kosmonautice, strojírenství, k opravě velkých a drahých komponentů, a umožňuje urychlení výroby některých dílů (několik hodin místo několika dní). Tím, že je metoda novější, probíhají stále výzkumy po celém světě, optimalizují se podmínky a parametry použití a je snaha tuto technologii učinit komerční a více využívanou různými firmami [6, 12, 17].

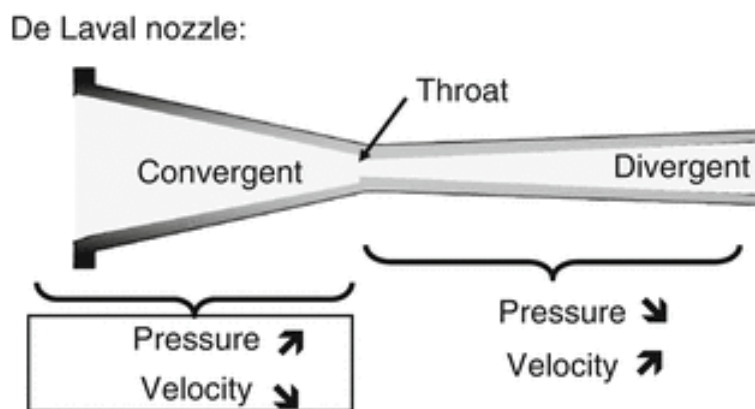
Nástřik je použitelný na povlaky odolné proti korozi (zinek a hliník), rozměrové restaurování a opravy (nikl, nerez, titan a hliník) a povlaky odolné proti opotřebení (karbid chromu – nikl chrom, karbid wolframu – kobalt a wolframová měď). K opravě dílů je ideální díky tomu, že nezpůsobuje deformace, praskání nebo tepelné ovlivnění opravovaného dílce. Je možné nejen renovovat drobné povrchové vady, ale i zatěžované plochy. Mnohdy mohou být úspory za opravu velkých a složitých dílů až desítky tisíc dolarů. Některé materiály nastříkané technologií cold spray mají lepší mechanické vlastnosti, než když jsou vyráběny jinou technologií (např. Ti-64 má vyšší odolnost vůči opotřebení než konvenčně vyrobený) [8, 16, 17].

Technologie je odlišná od jiných metod nástřiku tím, že prášek je naprašován za mnohem nižších teplot (důvod označení metody studenou) a tím nedochází k natavení částic prášku. Nástřik je vytvořen pouze plastickou deformací částic a jejich kinetickou energií. Cold spray lze popsat jako samokonsolidace pevných částic, které se spojí, i když jsou stále v pevném stavu (adheze částic na substrát). To nese hned několik výhod. Nedochází k oxidaci prášku vlivem teploty, a to má za následek homogenní a čistší nástřik, který je málo porézní.

Jako podklad pro nástřik prášku lze použít kovové, keramické nebo polymerní substráty rozmanitých tvarů. Tloušťka podkladu se odvíjí od použitého materiálu pro nástřik i podmínek, za kterých je prášek nanášen [7, 14, 17].

2.6.1 Princip technologie cold spray

Princip cold spray je jednoduchý. Inertní plyn je ohříván, částice kovu jsou unášeny plynem a urychlovány pomocí Lavalovy dýzy (viz Obr. 14). Nedochází k natavení částic prášku dopadajících na povrch s vysokou rychlostí. V důsledku jejich schopnosti se plasticky deformovat vzniká vrstva nástřiku, která je s minimálním obsahem oxidů.



Obr. 14 Lavalova tryska- průřez [32]

Rychlost částic u vysokotlakého CS se pohybuje kolem 1 200 m/s, což několikrát překračuje rychlost zvuku.

Plyny sloužící pro rozptýl částic prášku jsou:

- helium,
- dusík,
- směs helia a dusíku,
- suchý vzduch.

Helium a dusík (inertní plyn) jsou nejvhodnějšími plyny, ale z ekonomického hlediska je výhodnější a levnější dusík. Pokud je nezbytné použít jako nosný plyn helium, je možné postavit komoru s vysokou čistotou a helium recyklovat. Zvýší se jeho využitelnost a sníží se náklady. Na základě fyzikálních vlastností plynů by bylo ideálnější použití helia, ale ekonomický vliv je často rozhodující. Z fyzikálního hlediska je rozhodující rychlost zvuku v plynu a Machovo číslo. U helia je rychlost zvuku asi 1 000 m/s a u dusíku pouze třetinová. Vyšší

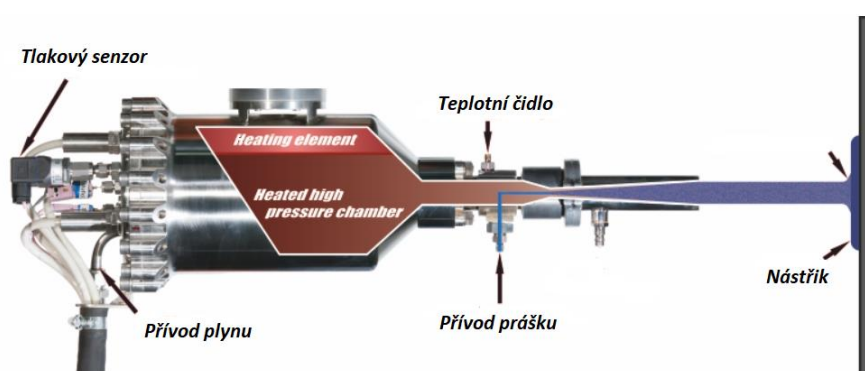
rychlost znamená vyšší hustotu částic a nástřik je rychleji tvořen. Bohužel náklady na výrobu helia jsou velmi vysoké a z tohoto důvodu se používá výjimečně, např. pro drahé materiály a kovy s vysokou kritickou rychlostí, přestože s použitím helia se dosáhne vyšší produktivity a lepšího zhutnění nástřiku. Lavalova tryska je konstruována také pro použití suchého vzduchu díky jeho podobným vlastnostem s dusíkem. Suchý vzduch se skládá z 78 % dusíku a rychlost zvuku je 343 m/s. Problém však může způsobit kyslík přítomný ve vzduchu, který může u některých materiálů způsobit jejich oxidaci. Jeho použití je omezeno na některé materiály, ale kvůli úspoře nákladů se využívá pro velké množství aplikací. Nosný plyn bývá přehřát na 1 100 °C. Zlepšení efektivity a pevnosti nástřiku lze dosáhnout zvýšením tlaku plynu a úpravou jeho teploty. Problém může nastat při velkém rozdílu teplot nosného (rozprašuje a nese prášek) a hnacího plynu (přehřátý urychlovací), protože se sníží kinematika částic a tím i účinnost nástřiku [6, 8, 10, 11, 12, 14, 16].

Cold sprayem je možné nanášet částice na jakýkoliv podkladový materiál s přípustnou drsností povrchu. Uvádí se, že doporučená drsnost je úměrná poloměru použitých částic (čím větší částice, tím je možná větší drsnost). Při nesprávně zvolené drsnosti bude povlak porézní a dojde k výraznějšímu promíchání substrátu s povlakem, což může mít negativní dopad na vlastnosti. Obecně se také nedoporučuje mít podklad hladký a vyleštěný. Textura substrátu je i nadále zkoumána pro zjištění adheze. Podklad se vždy musí volit na základě typu urychlovaných částic a je nutné upravit podmínky nanášení tak, aby se vytvořil povlak požadovaných vlastností a struktury. Při nevhodném zvolení křehkého substrátu a špatných parametrů cold spraye se mohou během nástřiku tvořit mikrotrhliny, které znehodnotí vrstvu. Cold spray má několik různých a navzájem na sobě závislých parametrů a je tedy nutné správně zvolit a nakombinovat parametry pro vznik kvalitního povlaku [12, 14, 16].

Lavalova dýza je nedílnou součástí stroje. Díky své geometrii a konstrukci umožňuje získat dostatečnou rychlost částic a tím pádem i jejich kinetickou energii, kterou při nárazu přemění na plastickou deformaci a teplo. Dýza udává také rozdíl tlaku na vstupu a tlaku na výstupu z dýzy, pomocí kterého je určeno Machovo číslo, které určuje, do jaké míry jsou urychleny částice v daném prostředí vůči rychlosti zvuku. K hlavním parametrům upravujících rychlost částic patří délka trysky, vliv průměr vstupního otvoru, průměr hrdla a výstupní otvor. Bylo zjištěno, že rychlost částic mědi vzrostla o 33 % po prodloužení trysky a také efektivita se pohybovala okolo 80 % místo pouhých 10 %. Urychlení částic a také Machovo číslo závisí na poloměru trysky, teplotě plynu a rychlosti plynu. Všechny tyto parametry se musí vyladit a správně nastavit. U každého materiálu se rozměry trysky mohou lišit a je třeba najít optimální parametry, aby nedocházelo k ucpání trysky. Tryska nemusí být vyrobena jen z oceli, ale může být slinuta z karbidu wolframu nebo může být její vnitřek povrchově upravit (např. povlakováním SiC). Pro cold spray byla speciálně navržena i krátká pistole, která se používá v omezeném místě aplikace nebo u malých průměrů výrobků. Výrobci prodávají několik typů pistolí s různou konstrukcí (viz Obr. 15 a Obr. 16) [12, 14, 15].



Obr. 15 Pistole 5/11 pro HPCS [6]



Obr. 16 Průřez pistolí 5/11 [6]

Kromě rychlosti částic je důležitá i jejich teplota. Bohužel tato vlastnost je obtížně měřitelná z důvodu nízkých hodnot (částice se nestihnou před dopadem ohřát v horkém plynu na vysokou teplotu) a velikosti částic (velmi malé a v pohybu). Z těchto důvodů se používá modelování cold spray pomocí termokonverze a přenosu tepla mezi částicemi a plynem, aby se zjistilo chování částic během nástřiku. Často se využívá modelu depoziční efektivity. Jedná se o empirický přístup, který je založen na experimentech, a je nejspolehlivější. Mohou se využít i teoretické modely (konvenční přístup), které se od skutečnosti a výsledků výrazně liší [14].

Cold spray lze rozdělit podle použitého tlaku na:

- vysokotlaký (HP),
- nízkotlaký (LP).

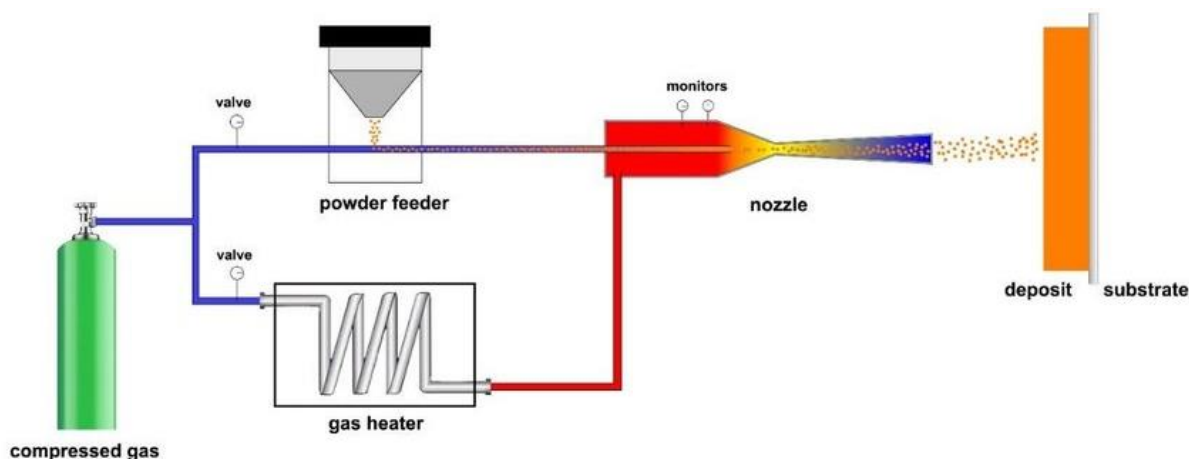
Rozdílem nejen tlak v pistoli ale i velikost přístroje, jeho cena, mobilita a také účinnost nástřiku (procento využitého prášku pro nástřik) [12, 30].

2.6.1.1 Vysokotlaký cold spray (HPCS)

Mezi přednosti používání vysokého tlaku v cold spray patří to, že nástřik má vyšší pevnost a celkově lepší vlastnosti. Vyšší tlak způsobí vyšší hustotu plynu a tím se lépe urychlují částice. Konstrukce Lavalovy trysky je uzpůsobena vyšším tlakům a usnadňuje zrychlení částic. Ty jsou přiváděny do trysky ještě před jejím zúžením [8, 12, 16].

Za možnou nevýhodu lze považovat velikost přístroje a jeho hlučnost. Zařízení je nepřenosné a velkorozměrové z důvodu vytváření vysokého tlaku. Pistole je upevněna na robotizovaném rameni, které umožňuje pohyby v různých osách, programovatelnost a synchronizaci pohybů [8, 12, 16].

Zařízení je konstruováno pro tlak do 70 barů a teploty do 1 100 °C, podávání prášku do pistole je zavedeno před zúžením Lavalovy trysky (viz Obr. 17). Rychlost částic je v rozmezí 800- 1 400 m/s a nejčastěji se jako hnací plyn používá dusík nebo helium. Aby se zabránilo zpětnému toku částic (pryč z trysky), tak v podavači prášku je vyšší tlak než v hlavním okruhu. Lavalova tryska bývá velká a drahá součást cold spraye. U HPCS dochází k rychlému opotřebení hrdla (z důvodu přívodu prášku před zúžením) a to způsobí odchylky v provozních podmínkách a nesprávné uložení částic. Vysokotlaký cold spray má vyšší účinnost než nízkotlaký [8, 12, 16].



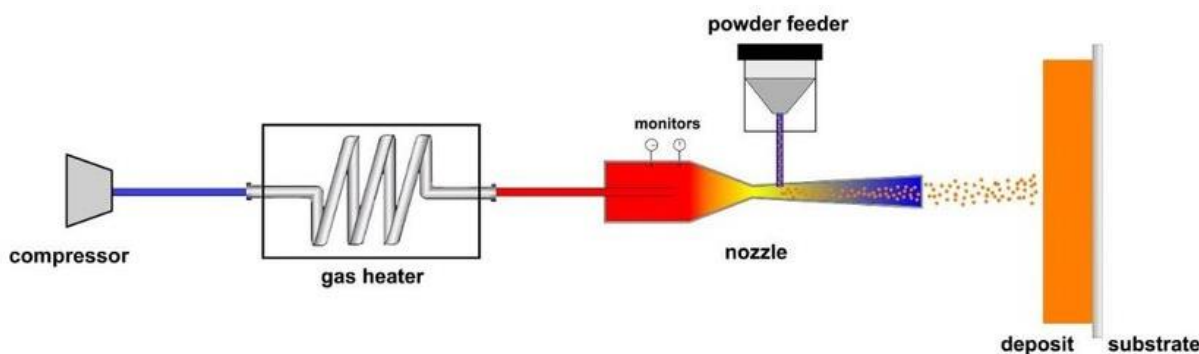
Obr. 17 Schéma vysokotlakého cold spray [28]

2.6.1.2 Nízkotlaký cold spray (LPCS)

Nejvýznamnější výhodou nízkotlakého cold spray je jeho velikost. Zařízení je malé a přenosné. Jeho konstrukce je jednoduchá a nevyžaduje velké a speciální díly, aby vydržely vysoké tlaky. Přístroj pracuje s tlaky dosahující hodnoty maximálně 35 barů a také s nižšími teplotami předehřátého plynu ohřátého až na 550 °C. U nízkotlakého cold spraye je nižší výstupní tlak a je nutné i omezení vstupního tlaku. Přívod prášku je v této konstrukci až za zúžením Lavalovy trysky, což má za následek mírně nehomogenní rozptýlení prášku (viz Obr. 18). Oproti tomu je výhodou konstrukce. K opotřebení trysky dochází v její nadzvukové části, to způsobí delší životnost trysky. Jako hnací plyny se nejčastěji používá dusík nebo suchý vzduch. Částice prášku jsou urychlovány na rychlost 300-600 m/s [12, 14, 16].

Vzhledem k jeho velikosti a přenosnosti se často využívá pro opravy na místě, kde se výrobek nachází. Není nutné řešit jeho přepravu a ruční ovládání a snadná manipulace zaručují rychlejší práci (nemusí se programovat pohyb robota) [14, 16].

Bohužel jsou omezené materiály pro aplikaci LPCS. Nevhodné jsou nedostatečně plastické kovy. Často se ale používají plastické materiály jako hliník, měď, zinek, cín a jejich slitiny. Nízkotlaký cold spray je také vhodný na nanášení ochranných korozivzdorných povlaků. Pro zlepšení otěruvzdornosti se nanáší směs hliníku a částic Al_2O_3 , která se dá použít i u HPCS [12, 14, 16].



Obr. 18 Schéma nízkotlakého cold spray [28]

2.6.2 Prášek a jeho výroba

Cold spray má široké spektrum použití a z tohoto důvodu musí disponovat různorodou aplikací prášku, který je potřebný na aplikaci jak materiálově, tak strukturně. Podle metody výroby mají částice kulatý tvar nebo jsou to mnohostěny. Pro technologii cold spray se dají použít prášky vyrobené pro 3D tisk, protože pro obě metody jsou požadovány vysoké nároky na kvalitu a vlastnosti prášku. Jednou z firem vyrábějící prášky je Sandvik [5, 14].

Prášky můžeme rozdělit do tří kategorií:

- prášky z jednoho materiálu,
- kompozitní prášky (směs),
- nanoprášky.

K tvorbě nástřiku dochází plastickou deformací částic prášku, a proto se pro cold spray používají materiály, které mají určitou míru plasticity. Tím jsou eliminované některé materiály nevhodné pro tuto technologii. Nejjednodušší je tvořit vrstvu z jednoho typu materiálu. Kompozitní prášky se vytvářejí smícháním dvou nebo více rozdílných prášků a směs je dána do podavače. Druhou možností je mít prášky odděleně v podavačích a přivedeny do pistole, kde dojde k jejich urychlení a smíchání během rozptylování, což je výhodou této aplikace. Dávkování odlišných typů prášku je možné naprogramovat tak, aby jejich množství bylo v požadovaném poměru. Možnost míchání prášků přináší velké výhody, protože kombinací tvrdých a měkkých materiálů (slouží jako pojivo a zároveň brání poškození tvrdých částic) vzniká specifický povrch. Zatím není možné nanášet samotné frakce keramických materiálů, ale je možné kombinovat keramiku s kovem (např. částice Al_2O_3 s hliníkem). Účinnost cold spraye je vysoká, ale

dochází k určitému procentu ztrát. Částice drahých materiálů je možné zachytit, shromáždit a prášek recyklovat [12, 14, 16].

Mezi často aplikované čisté kovy se řadí hliník, měď, nikl, titan, stříbro, niob, tantal a další. Místo čistých kovů lze použít prášek vyrobený ze slitin kovů, např. nikl-chrom, bronz, mosaz a slitiny, v nichž hlavní složku tvoří hliník nebo titan. Výhodou je, že lze vytvářet nástřiky z vysokotavitelných kovů, např. wolframu, protože není nutné roztavit částice prášku [6, 7, 8, 16].

Přívod prášku do trysky není určen pouze velikostí tlaku, který rozprašuje částice, ale i typem materiálu. Snadno zpracovatelné materiály (např. Al, Zn, Cu) se přivádějí často do nadzvukové části trysky, na rozdíl od obtížně zpracovatelných (potřebují i vyšší teplotu plynu), kde se prášek přivádí v podzvukové části. Tvrdé a křehké keramické částice jsou přiváděny do trysky až v nadzvukové části, aby se zabránilo poškození hrdla v důsledku eroze [14].

Velikost částic se pohybuje v rozmezí 5-100 μm v závislosti na typu materiálu, podmínek nanášení a případně na výrobci. Z důvodu snadného urychlení částic jejich velikost nepřesahuje 100 μm . Nejčastěji se používají prášky s velikostí částic 20-60 μm , ale mohou se vyskytnout i výjimky (Al, Zn). U malých částic je problém, že jsou velmi citlivé na ohřev (přestup tepla z plynu) a mohou také aglomerovat (shlukovat se) a proto následně nevytvoří požadovaný nástřík [5, 14].

Nanoprášky vyžadují odlišný způsob nanášení než větší částice. Nástřík probíhá za nízkých tlaků od 0,1 až do 20 kPa ve vakuové komoře a většinou se nosný plyn neohřívá. Nanoprášky, které jsou používány pro speciální aplikace vyžadují speciální konstrukci trysky, aby nedocházelo k jejímu ucpání práškem. Tyto prášky se používají pro tvorbu nanoporézních povlaků nebo pro malé a citlivé součástky jako jsou solární články. Vhodné jsou i pro vytvoření nanoarchitektonické struktury ve fotovoltaických a fotokatalytických aplikacích. Nanoprášky se připravují mechanickým legováním. K aplikaci nanoprášků lze také využít metody ADM (aerosol depoziční metoda), kdy částice jsou urychlovány vzduchem nebo héliem za atmosférického tlaku ve vakuu. Rychlosti částic jsou nižší, a to způsobí nižší pravděpodobnost vzniku rázových vln na substrátu [14, 16].

Následující vlastnosti částic mají vliv na vznik a kvalitu nástříku. Jedná se o:

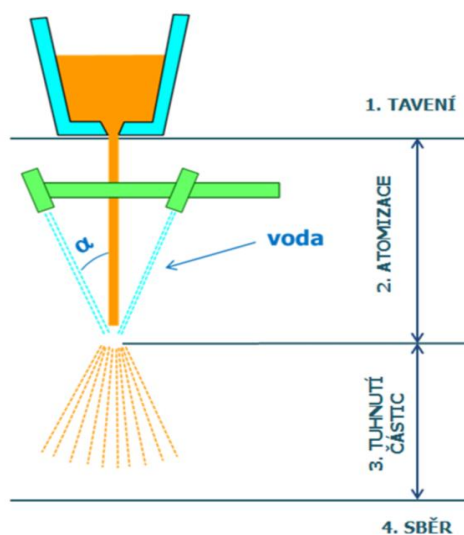
- teplotu prášku,
- morfologii,
- vnitřní architekturu.

Teplota prášku ovlivňuje jeho kritickou rychlost. Čím je vyšší teplota prášku, tím klesá kritická rychlost částic. Výhodou vyšší teploty částic je, že dochází k termomechanickému změkčení a snazšímu spojení se substrátem. Zvýšit teplotu lze dvěma způsoby, prvním je vyšší teplota hnacího plynu a druhým je možnost předežhřátí částic. Druhá metoda má několik nevýhod, ke kterým se řadí snížení tvrdosti a vznik oxidů. Z tohoto důvodu dochází ke cold spray ve vakuu [14, 17].

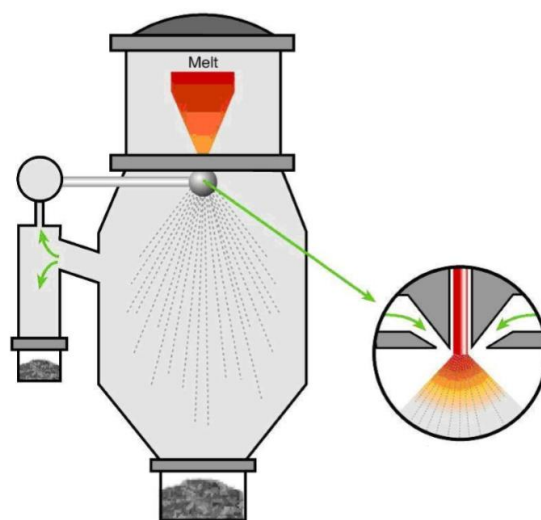
Dalším faktorem je morfologie prášku, tedy vnější tvar. Různou geometrii prášku lze získat odlišnými technologiemi výroby. Sférický tvar částic se dostane atomizací, úhlové (pravidelné nebo nepravidelné) pomocí mletí nebo cryomilling, a dendritický prášek elektrolyticky. Některé studie uvádějí, že jsou lepší úhlové částice než sférické. Zmiňují vyšší rychlost částic a tím lepší depozici, také nástřik má nižší porozitu a vyšší tvrdost. Oproti tomu dendritické prášky mají nižší rychlost než sférické (také nižší teplotu plynu), nanášejí se na tepelně citlivé materiály a jsou vhodné pro LPCS [14, 17].

Vnitřní architektura prášku se zabývá jeho specifickou vnitřní strukturou. Částice mohou mít porézní strukturu díky které dosáhnou vyšší rychlosti a tvoří podobný nástřik jako úhlové prášky. V důsledku porozity částic má vzniklá vrstva vyšší tvrdost ale také vyšší porozitu, což může být nežádoucí. Dalším typem jsou povlakované částice, tzn. že jádro je z jednoho materiálu a je obaleno druhým materiálem. Je to alternativní způsob nanášení nepružných a neplastických materiálů (jinak se tyto prášky mísí). Jádro bývá keramika, oxid nebo diamant. Povlak okolo jádra představuje pojivo a je tvořen z tvárného plastického materiálu, který je schopný plastické deformace. Příkladem tohoto typu prášku jsou diamantová jádra, která jsou nejdříve obalena v Ni a poté v Cu, která tvoří vnější plášť částic. Tento prášek byl úspěšně nanesen na hliníkový substrát [14, 17].

Nejčastěji se pro výrobu prášku uplatňují principy plynové nebo plasmové atomizace, případně se prášek připravuje pomocí kulového mlýnu. Atomizace spočívá v rozstřikování taveniny kovu proudem kapaliny (viz Obr. 19) nebo plynu (viz Obr. 20) a řadí se mezi fyzikálně-mechanické způsoby výroby prášku. Atomizace je nejlevnější a nejproduktivnější metoda [14, 18].



Obr. 19 Atomizace vodou [18]



Obr. 20 Atomizace vzduchem [18]

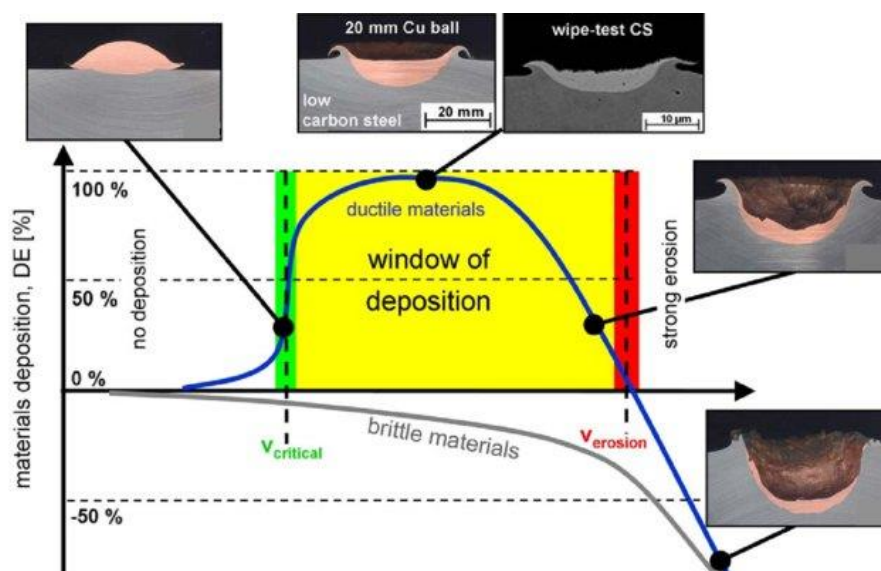
2.6.3 Vlastnosti nástřiku

Aby se nástřik vůbec vytvořil, je podstatné nastavit správné podmínky pro nanášení prášku. Nejdůležitější je rychlost částic dopadajících na povrch. Tato rychlost nemůže být zvolena náhodně, ale je určena na základě typů materiálu jak částic, tak podkladu.

Při nízké rychlosti nedojde k dostatečné plastické deformaci, nástřik nebude kompaktní a bude více porézní. Proto je zaveden pojem kritická rychlost, která je minimální rychlostí pro správnou tvorbu vrstvy.

Naopak bude-li rychlost dopadu tak vysoká, že částice vytvoří krátery, materiál je erodován (vytrysknut) a nevytváří žádný povlak. Tato rychlost je označována jako erozní.

Pro tvorbu kvalitního nástřiku se volí rychlost částic v tzv. depozičním okně, to je oblast mezi kritickou a erozní rychlostí (viz Obr. 21). V této oblasti má materiál dobrou adhezi a vytváří kompaktní povlak. U každého materiálu lze očekávat různou velikost a šířku depozičního okna. V tomto intervalu rychlostí může mít nástřik rozdílnou strukturu. Podle účelu použití se určí ideální rychlost částic [6, 11, 16].



Obr. 21 Depoziční okno (rychlost částic) [31]

Vliv na rychlost částic má i jejich velikost. S rostoucí velikostí klesá rychlost exponenciálně. Menší vliv na rychlost má nosný plyn, hlavně jeho průtok (rychlost a hustota) [12, 14].

Velkou výhodou technologie cold spray je možnost vytvořit vrstvy rozmanitých tloušťek od několika μm po desítky mm. Jiné metody tepelných nástřiků mají omezené rozmezí síly povlaku. Pomocí PVD nebo CVD lze vytvořit vrstvy o tloušťce od desetin μm až po desítky μm , u termálního nástřiku se hodnoty pohybují v rozmezí desítek μm až po 10 mm a u návaru lze dosáhnout 10-20 mm. Tvorbu různorodé tloušťky povlaku usnadňují tlakové síly působící v objemu materiálu, které oproti tahovému napětí znemožňují odtržení vrstvy a vznik trhlin v nástřiku [8].

K dosažení vhodné adheze částic k substrátu je možné manipulovat s těmito parametry:

- snížit velikost částic,
- zvýšit teplotu plynu,
- zvýšit tlak plynu.

V některých případech lze zlepšit adhezi dalšími metodami jako je:

- upravit povrch substrátu,
- ohřát substrát,
- změnit texturu substrátu.

K ulpění částic na substrátu přispívá také čistota povrchu a jeho úprava. Nejvhodnější je povrch bez nečistot a oxidů, odmaštěný a očištěný. Oxidy narušují kovovou vazbu mezi atomy a vrstva není kvalitní. Z důvodu znečištěného povrchu se k odstranění nežádoucích látek volí technologie pískování, tryskání nebo broušení. Při tryskání je nutné zvolit správnou velikost dopadajících částic na povrch a kontrolovat průměr vzniklých důlků. Částice aplikované při cold spray by měly mít co nejvíce podobné rozměry, jinak dojde k vadnému spojení, a tedy ke snížení pevnosti rozhraní a k nekvalitnímu nástřiku.

Stejně jako u drsnosti povrchu neexistuje obecné pravidlo, totéž platí i u ohřevu substrátu. V některých případech došlo k lepší adhezi, v jiných to nemělo žádný vliv. U některých materiálů byly dokonce nalezeny oxidy z důvodu ohřátého substrátu. U materiálů, na které to mělo pozitivní vliv, se jev označil jako termomechanické změkčení substrátu. Tento jev umožňuje proniknutí částic hlouběji do substrátu a tím zlepšuje adhezi. Povrch, který přispívá k adhezi a nezpůsobuje odraz částic, se nazývá aktivovaný povrch a aktivační parametr charakterizující tento povrch je vztažen k drsnosti povrchu [14].

Pro změnu textury povrchu je používána laserová technologie. Texturovaný povrch zlepšuje adhezi, pevnost spoje a také zlepšuje mechanické ukotvení částic na povrchu. Textura povrchu znamená, že laser vytvoří na povrchu substrátu otvory o určitém průměru, hloubce, orientaci a rozteči. Tyto parametry se mohou lišit, ale na jednom kuse výrobku bývají stejné a tvoří pravidelnou povrchovou topografii.

Nástřik je také minimálně porézní, většinou se hodnota porozity pohybuje pod 1 %. Je také velmi čistý, nevyskytují se zde oxidy a nedochází ke změně složení slitiny. U metod, u kterých dochází k natavení částic, mohou kapičky taveniny zoxidovat a oxid se posléze bude vyskytovat ve vytvořeném nástřiku. Během letu částic je pravděpodobné, že budou probíhat určité reakce taveniny s okolním prostředím a dojde ke vzniku nežádoucích sloučenin (nejen oxidů) a odpaří se legující prvky. Tyto jevy mohou ovlivnit složení nástřiku i jeho vlastnosti. Cold spray tyto nežádoucí jevy eliminuje, a navíc zachovává mikrostrukturu prášku. Za nevýhodu lze považovat ztrátu plasticity a tažnosti, ale lze je částečně obnovit následujícím tepelným zpracováním, ale tímto zpracováním se může také mírně snížit pevnost. [7, 8, 10, 11, 12, 14, 17].

Žíhání je nejčastější metodou tepelného zpracování, díky kterému lze upravit vlastnosti nástřiku. Tepelné zpracování má vliv na mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a na tribologii. Lze také dosáhnout ještě nižší porozity, zvýšení tažnosti a také pevnější mezičásticové vazby [17].

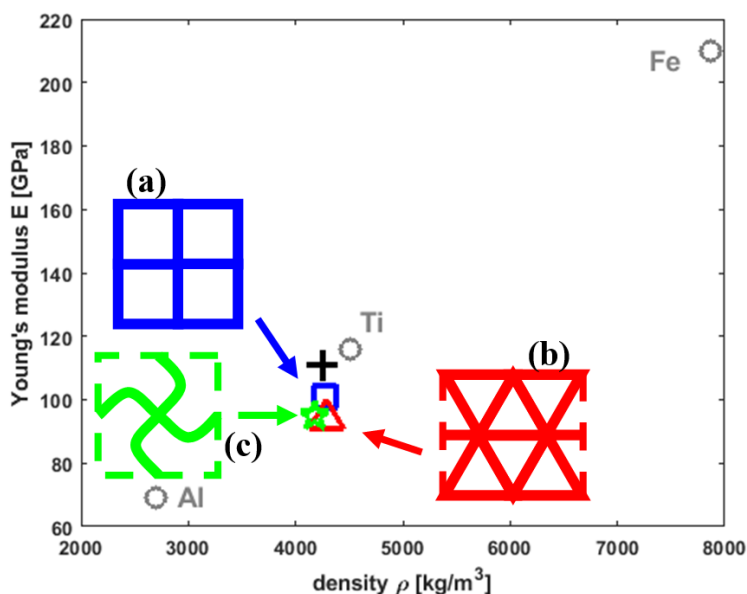
Technologie cold spray byla v posledních letech zdokonalena a nadále se inovuje. Má potenciál a dále se zkoumají další možnosti a vlastnosti. Je snaha predikovat chování procesu, optimalizovat efektivitu a předpovídat strukturu nástřiku.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experiment v této diplomové práci spočívá v kombinaci dvou materiálů s odlišnými vlastnostmi, jejichž spojení za současného využití architektury materiálu, lze dosáhnout mnohem lepších vlastností, které se budou blížit k ušlechtilějším prvkům.

V tomto experimentu je použit hliník jako substrát a železo jako zpevňující prvek. Do hliníkové tvářené destičky jsou vyfrézované drážky předem určené geometrie a následně je na ni nanášena technologií cold spray vrstva železa. Poté je vyříznuta vrstva, ve které se vyskytují oba prvky, a obsahuje danou geometrii. Tato vrstva je následně dále zkoumána a zkoušena. Zjišťuje se pevnost spojení, adheze částic a struktura rozhraní. Byly provedeny tahové zkoušky a měřeno napětíové pole.

Předpokládané vlastnosti architektonických materiálů jsou zaznamenány na obrázku Obr. 22 a jsou srovnávány s vlastnostmi hliníku, železa a titanu [21, 34, 36]. Lze vidět, že všechny tři geometrie mají mít skoro stejné výsledné vlastnosti.



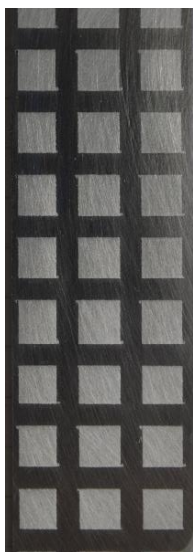
Obr. 22 Předpokládané vlastnosti architektonických materiálů [34]

3.1 Geometrie drážek

Před provedením experimentu byl proveden výpočet pro ideální typ geometrie vyztužení. Profil drážky měl čtvercový půdorys. Byly navrženy tři následující geometrie:

- čtvercová síť (viz Obr. 23),
- sinusová síť (viz Obr. 24),
- trojúhelníková síť (viz Obr. 25).

Následně se zkoumaly vzory a byly porovnávány hodnoty zkoušek.



Obr. 23 Čtvercová síť



Obr. 24 Sinusová síť



Obr. 25 Trojúhelníková síť

Profil drážek byl také optimalizován a byly navrhnuty dva typy:

- čtvercová drážka (označení u),
- V – drážka (spíše lichoběžník a označení v),

Byly uskutečněny obě zmiňované varianty. Třetí sada vzorků byla vytvořena cold sprayem obou materiálů a pro vytvoření čtvercové geometrie byla použita mřížka, přes kterou se nanášel hliník.

3.1.1 Měření tvrdosti

Tvrdost byla měřena na tvrdoměru od výrobce Qness, typ Q10A (viz Obr. 26) [27]. Na každém vzorku byly provedeny minimálně 3 řady měření. Každá řada přecházela z hliníku, přes rozhraní do železa stříkaného CS a měla alespoň 10 vpichů. Tvrdost byla měřena ve Vickersech se zatížením 200 g, tedy se jedná o mikrotvrdost HV 0,2. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v následujících kapitolách.



Obr. 26 Tvrdoměr Q10A [27]

3.1.2 Provedení tahové zkoušky

Tahové zkoušky byly provedeny u vzorků s V-drážkou se všemi geometriemi. Vzorky byly dlouhé a tenké pásy, cca 25 mm dlouhé s počátečními průřezy mezi 30 a 40 mm². Zkoušky byly provedeny na přístroji od firmy Zwick Roell, typ Z250 (viz Obr. 27) [28]. Protože se nejednalo o standartní zkušební tělesa, byly vzorky upnuty do mechanických čelistí pro ploché vzorky.

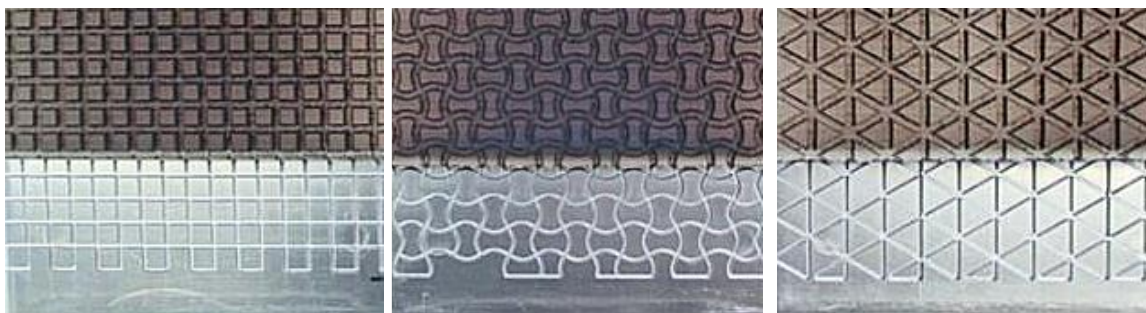


Obr. 27 Zwick Roell, Z250

K pořízení záznamů z tahových zkoušek se použila kamera od firmy Sobriety a na záznam se aplikovala digitální korelace obrazu (DIC). Povrch byl monitorován, aby se získaly obrazy pro výpočetní korelaci digitálního obrazu a mapy posunu povrchu. Díky tomu bylo možné sledovat lokalizaci deformační odezvy v jednotlivých částech mikrostruktury [37].

3.2 První experiment

První sada vzorků měla čtvercový profil drážky a byly vyhotoveny všechny tři typy geometrie drážky. Na tyto vzorky byla použita slitina hliníku EN AW5754-H22, AlMg3 od firmy Aluplus, s.r.o. Do substrátu z hliníkové slitiny byly vyfrézovány drážky čtvercového profilu a následně se nanášelo železo technologií cold spray v Německu (viz Obr. 28). Pro nanášení železa cold sprayem se jako nosný plyn použil dusík. Železo bylo stříkáno za teploty 900 C° při tlaku 50 bar. Prášek železa byl dodán od firmy Nanoval a jednalo se o prášek s čistotou 99,9 % a velikost částic se pohybovala v intervalu 10–32 μm. Vzorky poté byly ztenčeny na cca 2 mm, rozřezány na vzorky pro tahové zkoušky a vzorky k pozorování struktury.



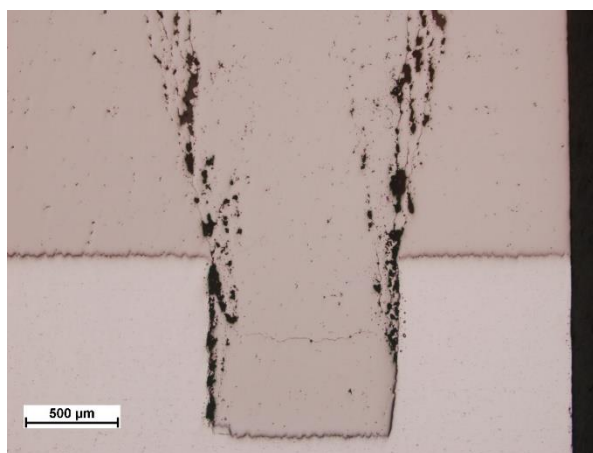
Obr. 28 Vytvořené vzorky všech tří geometrií před řezáním

3.2.1 Struktura a rozhraní

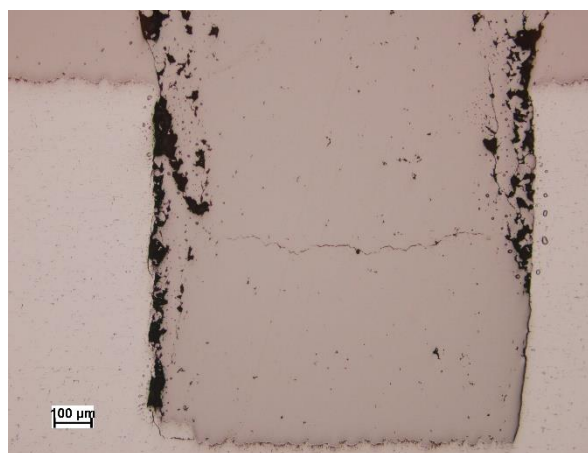
Zkoumalo se rozhraní a struktura nástřiku u všech typů geometrie jak ve směru nástřiku, tak kolmo na směr nástřiku. Snímky jsou pořízeny na světelném mikroskopu.

3.2.1.1 Čtvercová geometrie

- Kolmo ke směru nástřiku

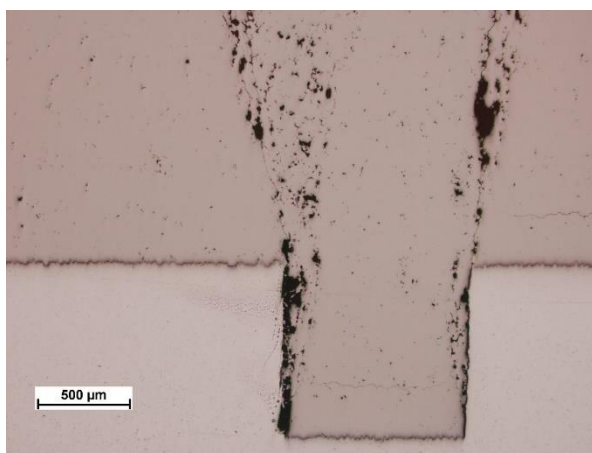


*Obr. 29 Kolmo ke směru nástřiku,
50x zvětšen nástřik a drážka*



*Obr. 30 Kolmo ke směru nástřiku,
100x zvětšena drážka*

- **Rovnoběžně se směrem nástřiku**



*Obr. 31 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
50x zvětšena drážka a nástřik*

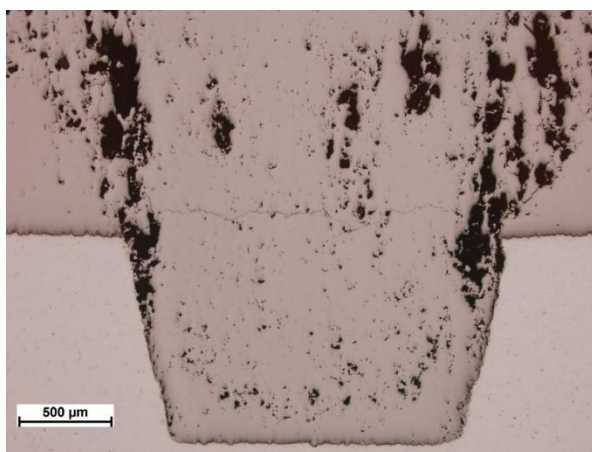


*Obr. 32 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšen detail drážky*

Na obrázcích struktur lze pozorovat výraznou porozitu v okolí drážek. Póry se nacházejí od hrany drážky přes celý nástřik až k povrchu. Na snímcích lze také vidět drobné trhlinky, které spojují často několik pórů. Na zvětšených snímcích lze také pozorovat špatnou adhezi se substrátem, což je zřejmě způsobenou svislou stěnou drážky. Místa se také v drážce blízko stěny vyskytují malé, samostatné částice a velké póry. Na dně drážky (stěna kolmá k nástřiku) je adheze a vytvořilo se souvislé rozhraní nástřiku a substrátu. Struktury jsou podobné jak ve směru rovnoběžném, tak ve směru kolmém na směr nástřiku CS.

3.2.1.2 Sinusová geometrie

- **Kolmo ke směru nástřiku**

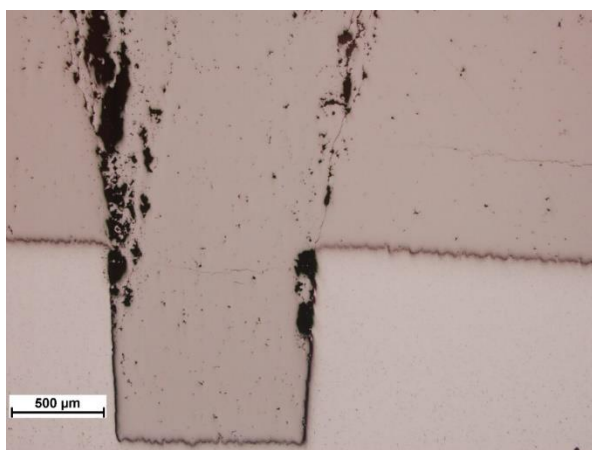


*Obr. 33 Kolmo ke směru nástřiku,
50x zvětšena drážka*

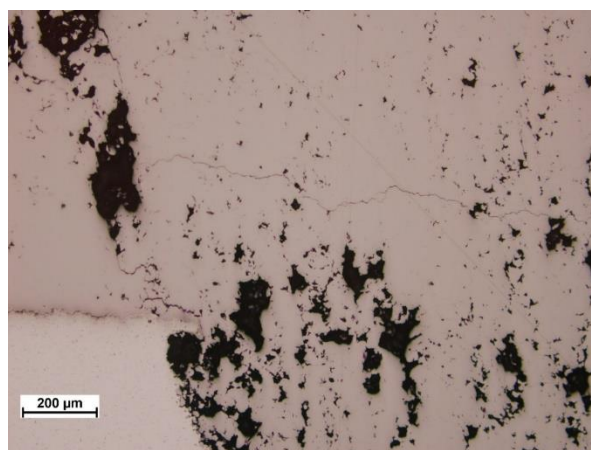


*Obr. 34 Kolmo ke směru nástřiku,
100x zvětšen detail drážky*

- **Rovnoběžně se směrem nástřiku**



*Obr. 35 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
50x zvětšena drážka*

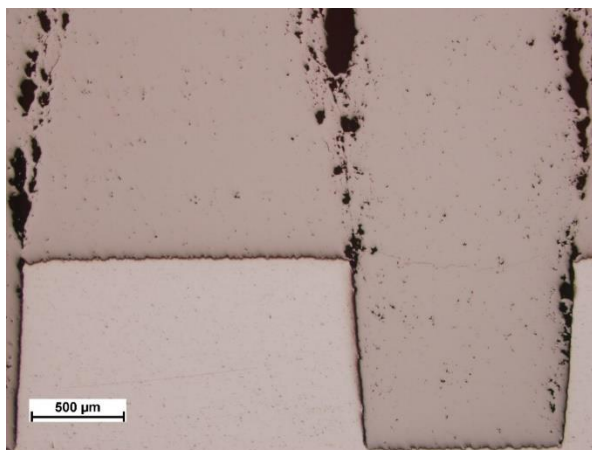


*Obr. 36 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšena hrana drážky a nástřik*

Na snímcích struktury lze pozorovat, že porozita ve směru rovnoběžném s nástřikem CS je větší než v kolmém směru. Adheze na svislých stěnách drážek je lepší než u čtvercové geometrie, ale pořád není kvalitní. Póry v nástřiku směřující z drážek jsou větší než v případě čtvercové geometrie, ale póry jsou často spojeny drobnými trhlinami.

3.2.1.3 Trojúhelníková geometrie

- **Kolmo ke směru nástřiku**

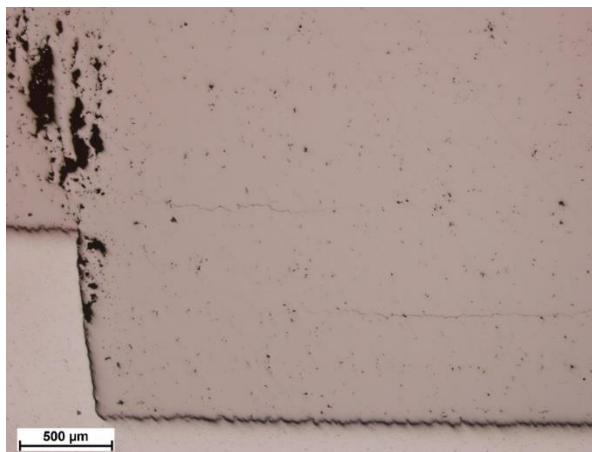


*Obr. 37 Kolmo ke směru nástřiku,
50x zvětšen nástřik mezi drážkami a drážka*

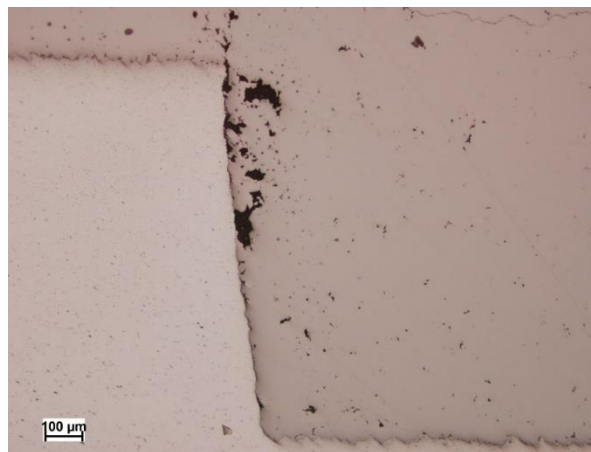


*Obr. 38 Kolmo ke směru nástřiku,
100x zvětšen detail drážky*

- **Rovnoběžně se směrem nástřiku**



*Obr. 39 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
50x zvětšen nástřik a drážka*

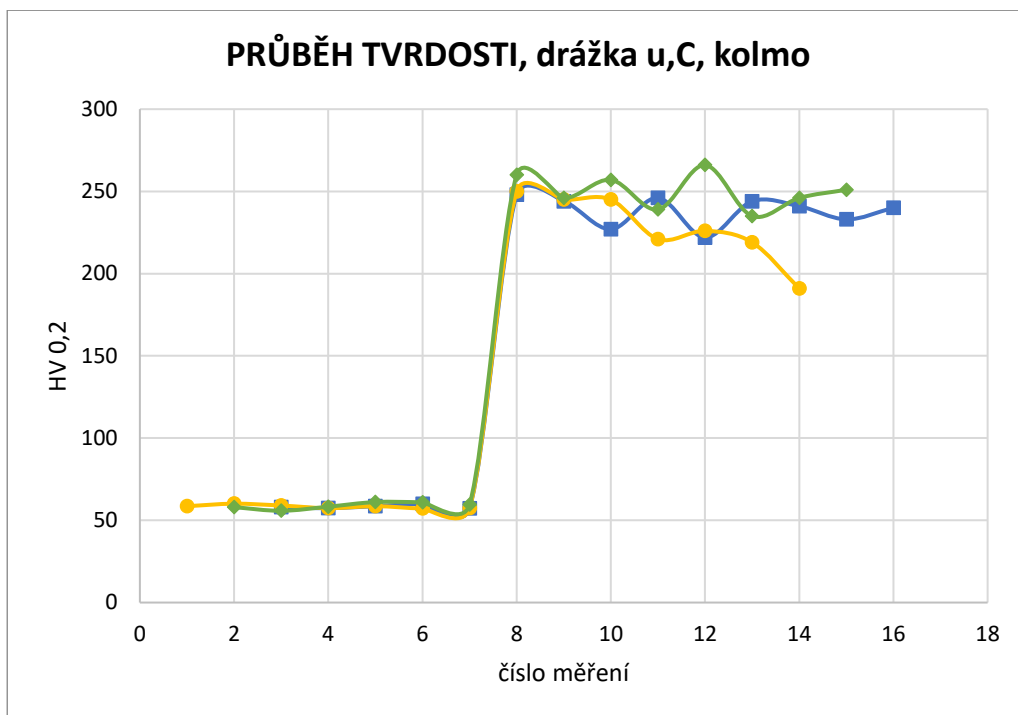


*Obr. 40 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšena hrana drážky*

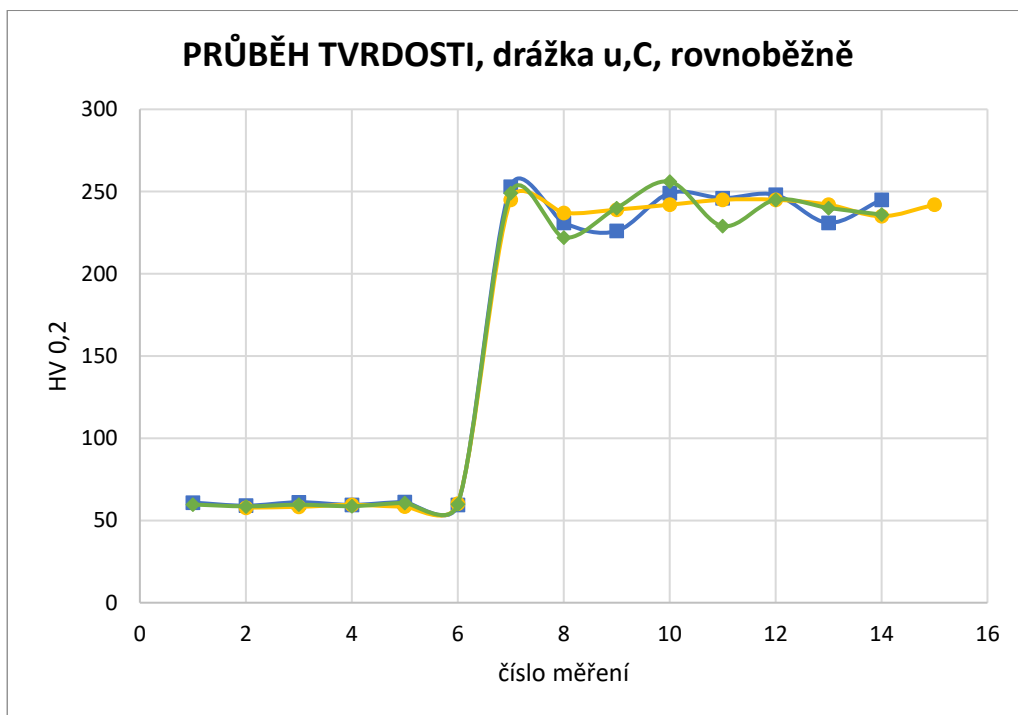
Porozita u této geometrie je největší v oblasti hran a směřuje k povrchu nástřiku. Póry jsou větší než v ostatních případech a lze také pozorovat trhliny napříč nástřikem. Trojúhelníková geometrie drážek se čtvercovým profilem má zřejmě nejlepší adhezi částic železa na svislých stěnách.

3.2.2 Měření tvrdosti

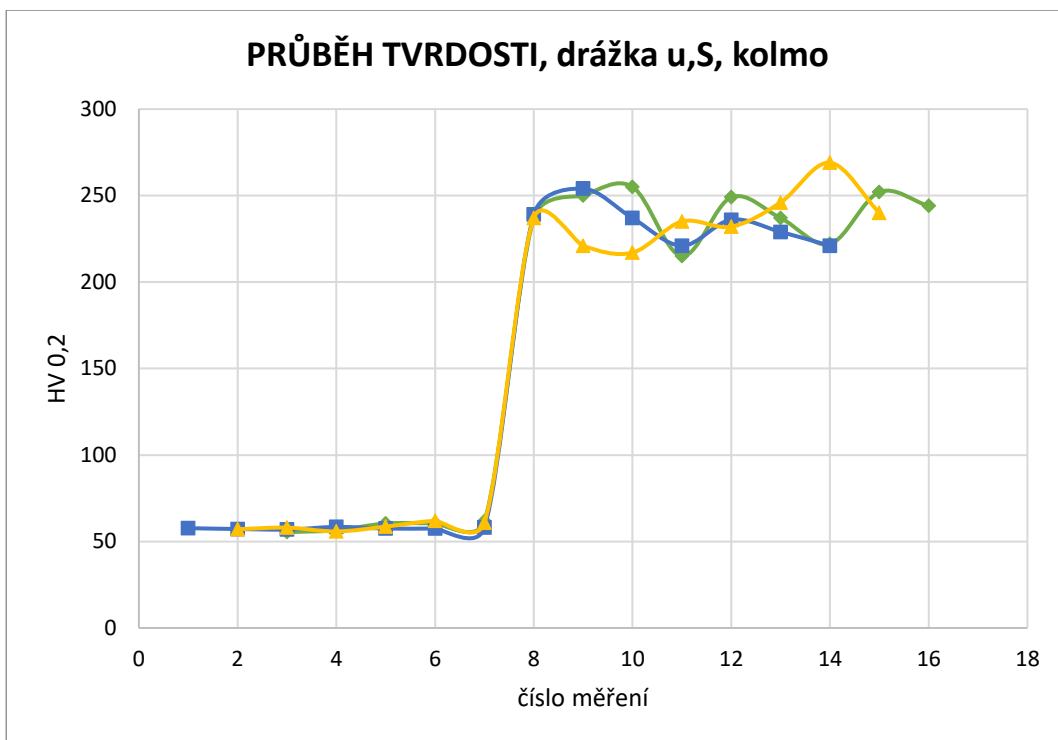
Výsledky z měření tvrdosti jsou uvedeny v grafech Graf 1 až Graf 6. Označení v grafech je následující: drážka u značí drážku čtvercového profilu, písmeno C znamená čtvercovou geometrii, S je sinusová geometrie a T je trojúhelníková geometrie a jako poslední je uveden směr k nástřiku, ve kterém byla tvrdost měřena.



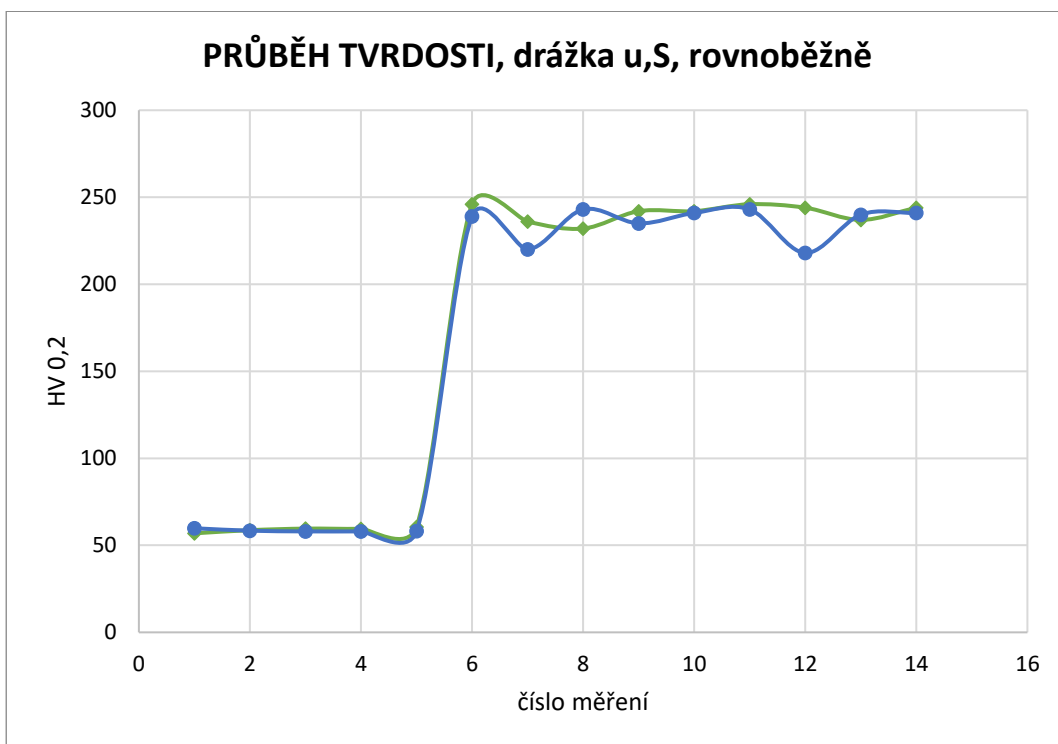
Graf 1 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, C geometrie, kolmo



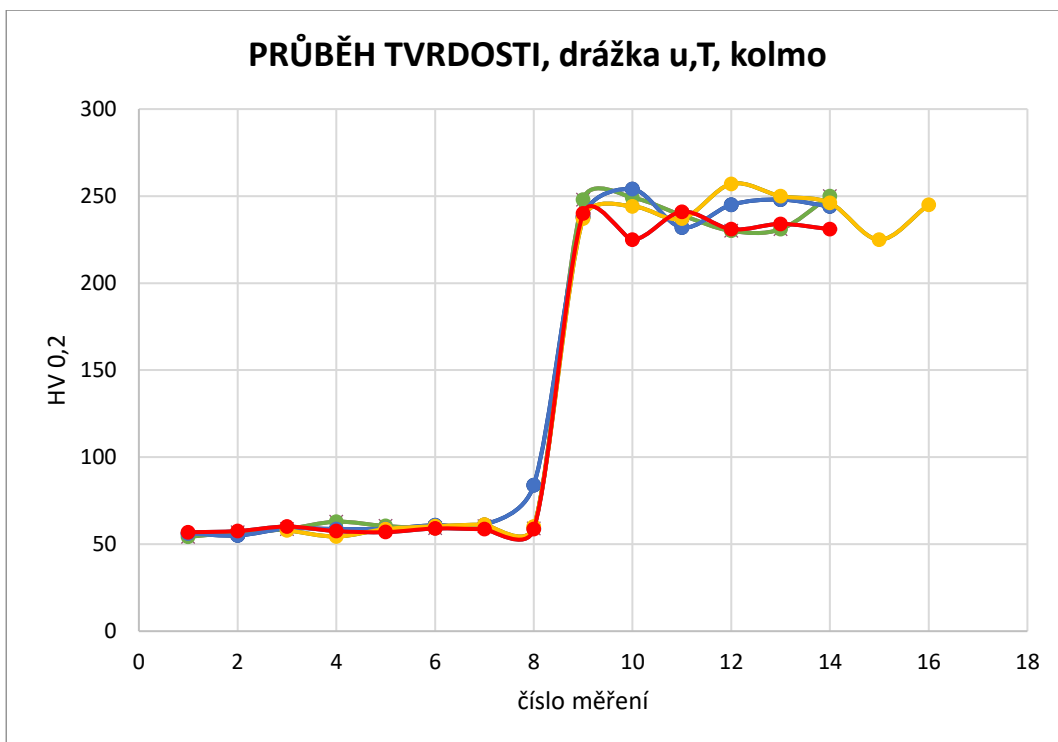
Graf 2 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, C geometrie, rovnoběžně



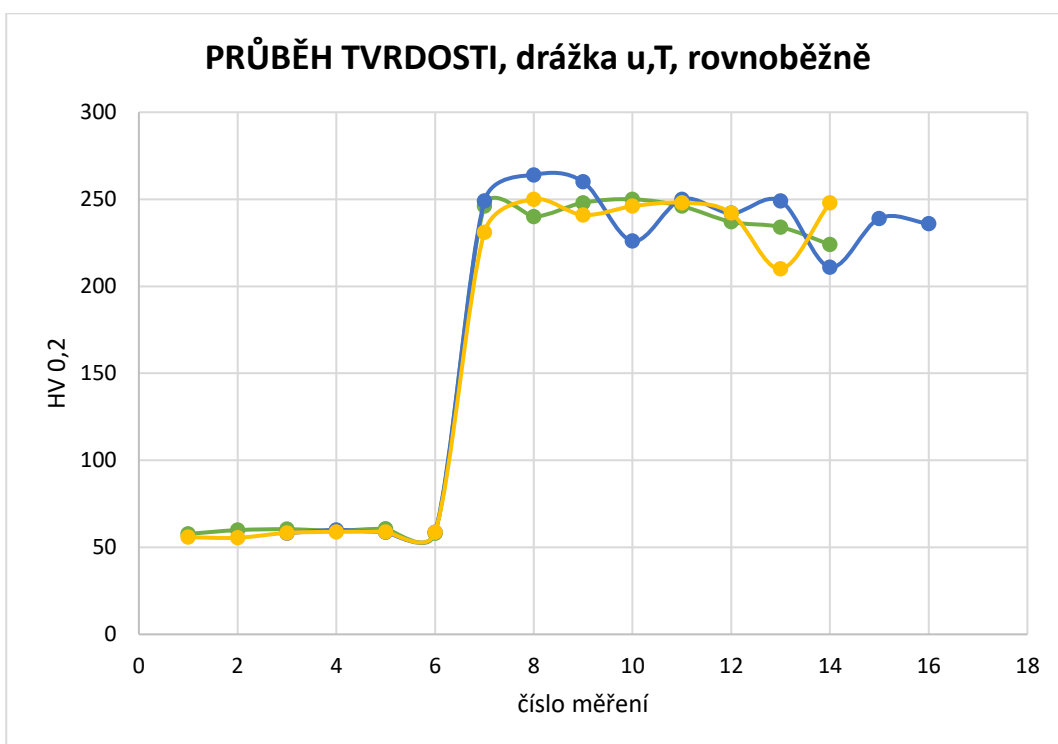
Graf 3 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, S geometrie, kolmo



Graf 4 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, S geometrie, rovnoběžně



Graf 5 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, T geometrie, kolmo



Graf 6 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, T geometrie, rovnoběžně

Z hodnot byly spočítány pro daný vzorek průměrné hodnoty, které jsou uvedeny v tabulkách Tab. 1 a Tab. 2.

Tvrdost HV 0,2 pro železo		
Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo
drážka u, T	241,04	240,42
drážka u, C	240,72	239,25
drážka u, S	238,28	237,29

Tab. 1 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Fe

Tvrdost HV 0,2 pro hliník		
Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo
drážka u, T	58,60	58,58
drážka u, C	59,56	58,51
drážka u, S	58,76	58,34

Tab. 2 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Al

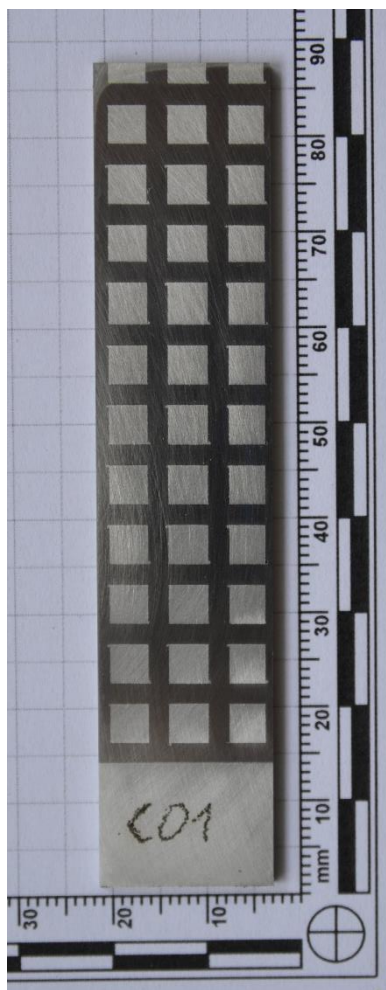
Z průběhů tvrdosti je zřejmé, že tvrdost hliníku je bez výrazných změn. Hliníkový substrát byl tvářen a díky tomu není tvrdost proměnlivá, pouze vznikl malý rozdíl ve zkoumaných vzorcích (viz Tab. 2). Tvrdost železa je závislá na směru stříkání CS, ale s malým rozdílem tvrdostí (necelé 2 HV 0,2) a je vyšší v rovnoběžném směru (viz Tab. 1). Tvrdost železa je proměnlivá, což může být způsobeno jeho pórovitostí.

3.3 Druhý experiment

Druhá sada vzorků měla V – profil drážky (spíše lichoběžníkový tvar) a byly vyhotoveny všechny tři typy geometrie drážky. Označení C znamená, že geometrie drážek je čtvercová (označená 5.1.1), T označuje trojúhelníkovou geometrii (označená 5.4.1) a písmeno S geometrii sinusovek (označená 5.2.1) a čísla za písmenem specifikují vzorek.

Vzorky byly vyrobeny z čistého hliníkového plechu (Al99,5; polotvrký, EN AW - 1050A H24; EN 573-3) o tloušťce 10 mm, který dodala firma Alcom Alval s.r.o. Následně byly do hliníku vyfrézovány V-drážky a poté cold sprayem naneseno železo. Pro nanášení železa cold sprayem byl jako nosný plyn použit dusík, železo bylo stříkáno za teploty 900 C° při tlaku 50 bar. Prášek železa byl dodán od firmy Nanoval a jednalo se o prášek s čistotou 99,9 % a velikost částic se pohybovala v intervalu 10–32 µm). Takto vytvořené vzorky pak byly ztenčeny na cca. 2 mm, rozřezány na vzorky pro tahové zkoušky a vzorky k pozorování struktury.

Na obrázcích Obr. 41 až Obr. 43 jsou vzorky na tahovou zkoušku a lze vidět geometrii, která bude namáhána.



Obr. 41 Čtvercová geometrie



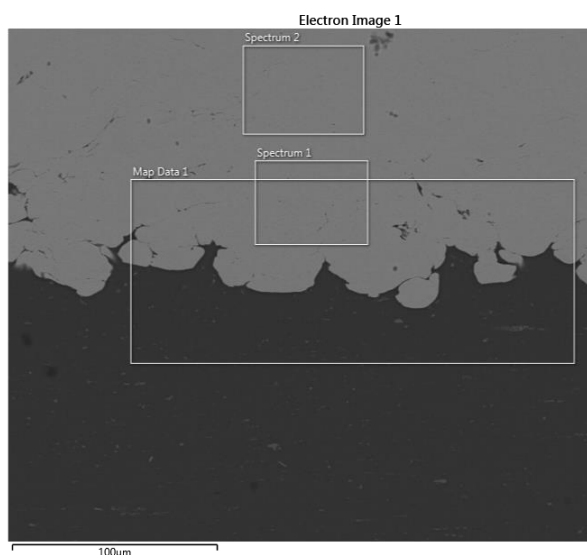
Obr. 42 Sinusová geometrie



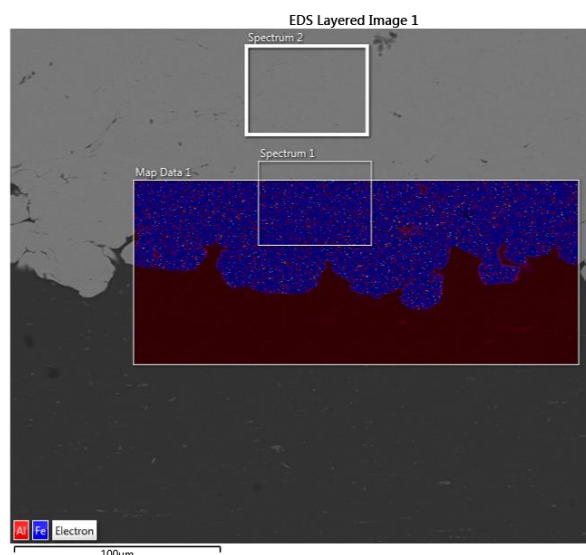
Obr. 43 Trojúhelníková geometrie

3.3.1 Chemická analýza rozhraní

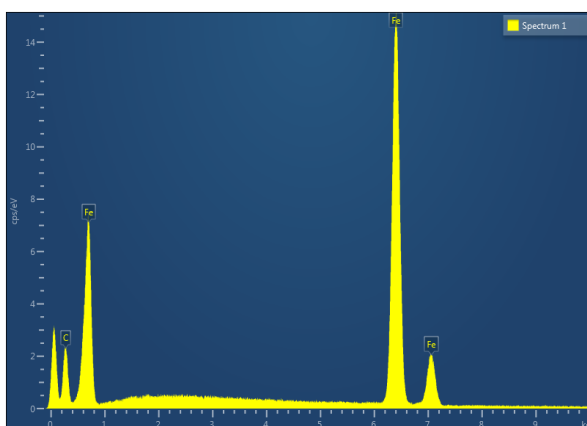
Byla provedena chemická analýza rozhraní tvářeného hliníku a železem nanášeným cold sprayem na vzorku s čtvercovou geometrií a rozhraní bylo ve směru stříkání cold spraye (označení 5.1.1. L). Analyzovaly se 3 oblasti – spektrum 1, spektrum 2 a map data (viz Obr. 44). Oblasti spektrum 1 a spektrum 2 jsou složeny pouze ze železa (viz Obr. 46 a Obr. 47). Oblast map data znázorňuje, že došlo k promíchání Al a Fe a že rozhraní není rovné a vznikly 2 oblasti Al oddělené od substrátu (viz Obr. 45, Obr. 48 až Obr. 50).



Obr. 44 Vyznačené oblasti pro analýzu

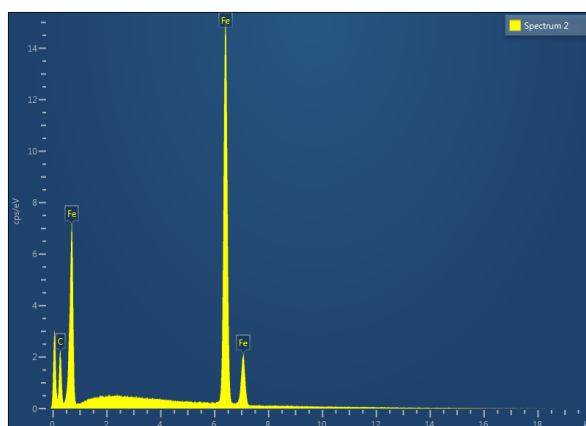


Obr. 45 Výsledek EDS analýzy a rozložení prvků



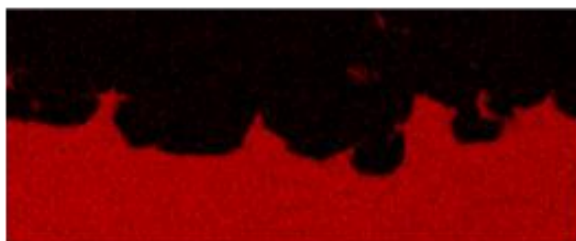
Obr. 46 Výsledek chem. analýzy spektra 1

Al K series

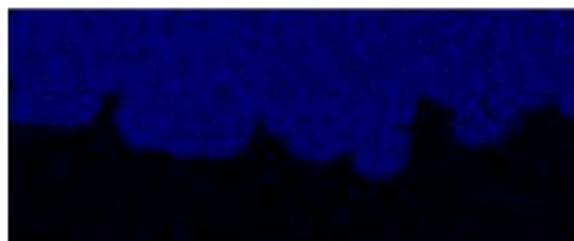


Obr. 47 Výsledek chem. analýzy spektra 2

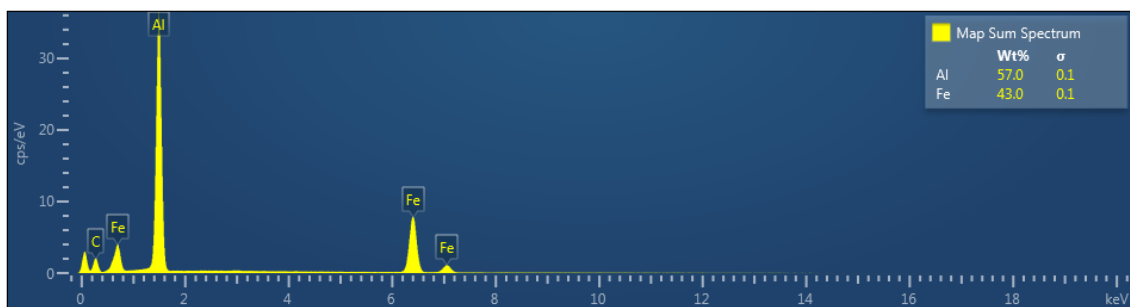
Fe K series



Obr. 48 Rozložení hliníku na rozhraní



Obr. 49 Rozložení železa na rozhraní



Obr. 50 Výsledek chem. analýzy rozhraní

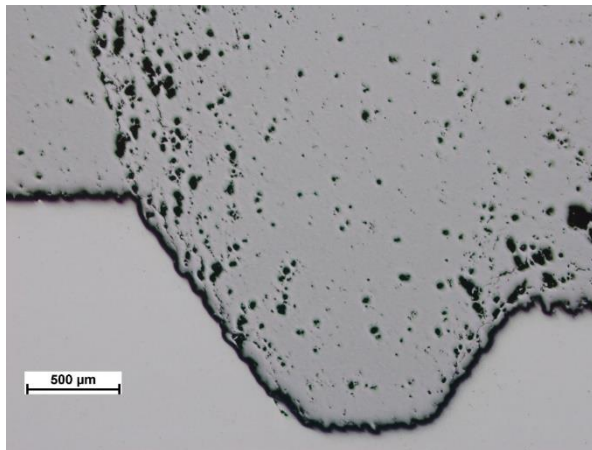
Z chemické analýzy vyplývá, že železo nanášené metodou cold spray není znečištěno. Uhlík se v grafech vyskytuje z důvodu nauhličení vzorků k analýze do elektronového mikroskopu. Ve vrstvě se nevyskytují žádné nečistoty a vměstky. Lze pozorovat nerovné rozhraní, což je patrné i na snímcích ze světelného mikroskopu.

3.3.2 Struktura a rozhraní

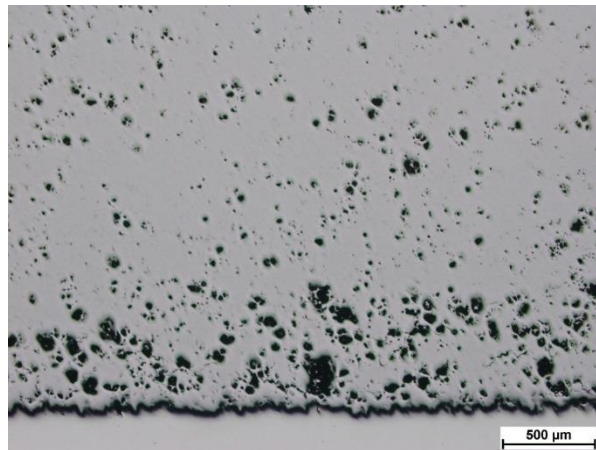
Zkoumalo se rozhraní a struktura nástríku u všech typů geometrie jak ve směru nástríku, tak kolmo na směr nástríku. Snímky jsou pořízeny na světelném mikroskopu.

3.3.2.1 Čtvercová geometrie

- Kolmo ke směru nástríku

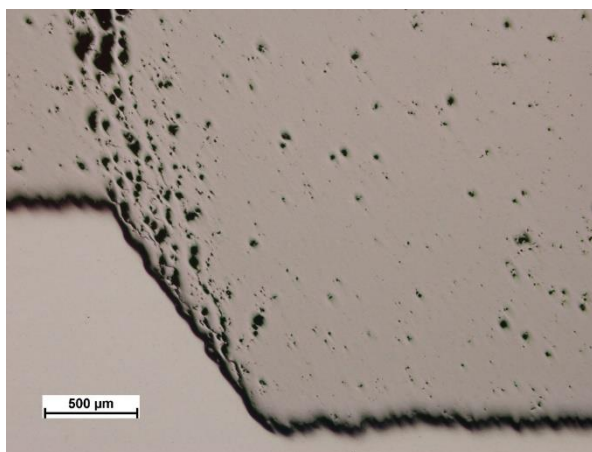


Obr. 51 Kolmo ke směru nástríku, 50x zvětšen nástrík a drážka

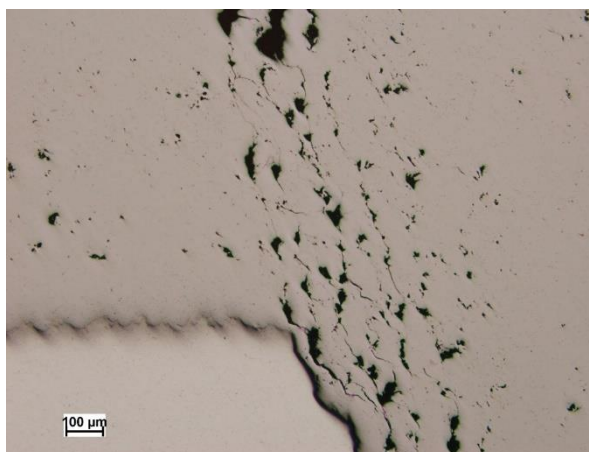


Obr. 52 Kolmo ke směru nástríku, 50x zvětšen nástrík, velmi porézní

- **Rovnoběžně se směrem nástřiku**



*Obr. 53 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
50x zvětšena drážka*

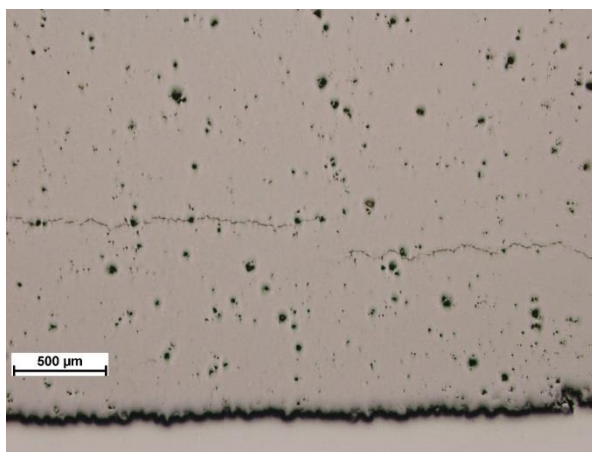


*Obr. 54 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšena hrana drážky s trhlinami*

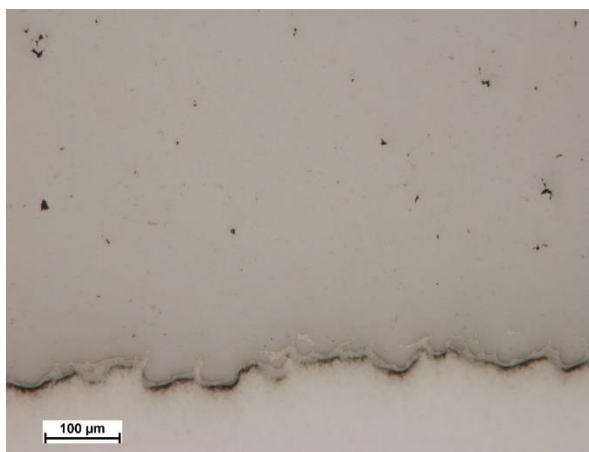
Na těchto snímcích profilu V-drážky (možná spíše lichoběžníkové tvaru) lze pozorovat vysokou porozitu. Velké množství pórů se vyskytuje jak od hrany drážky k povrchu, tak také v celém objemu nástřiku. Velké množství malých, rozptýlených pórů je viditelné v obou zkoumaných případech. Adheze částic je lepší než u typu čtvercových drážek a zřejmě je to způsobeno absencí svislých stěn.

3.3.2.2 Sinusová geometrie

- **Kolmo ke směru nástřiku**

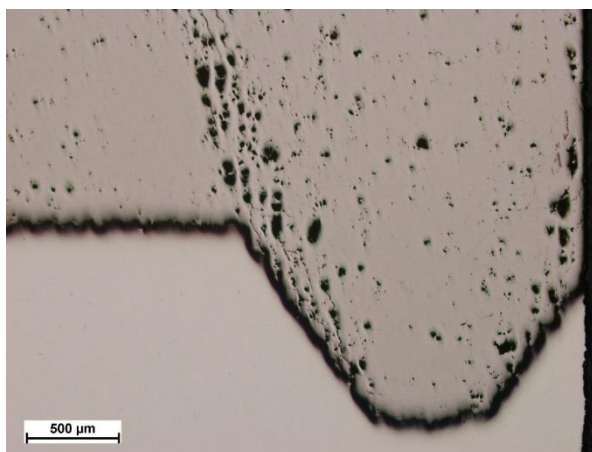


*Obr. 55 Kolmo ke směru nástřiku,
50x zvětšen nástřik*

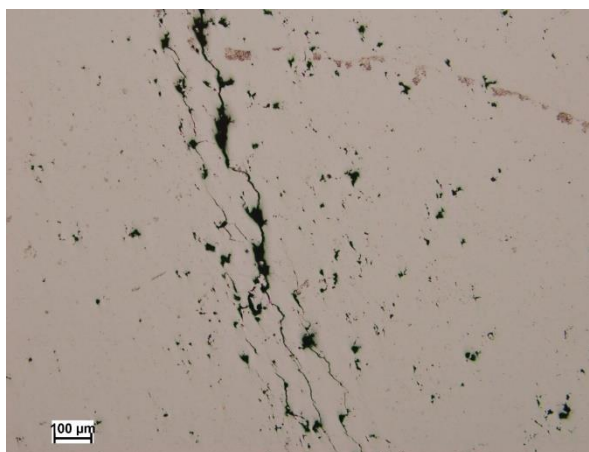


*Obr. 56 Kolmo ke směru nástřiku,
200x zvětšeno rozhraní*

- **Rovnoběžně se směrem nástřiku**



*Obr. 57 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
50x zvětšena drážka*

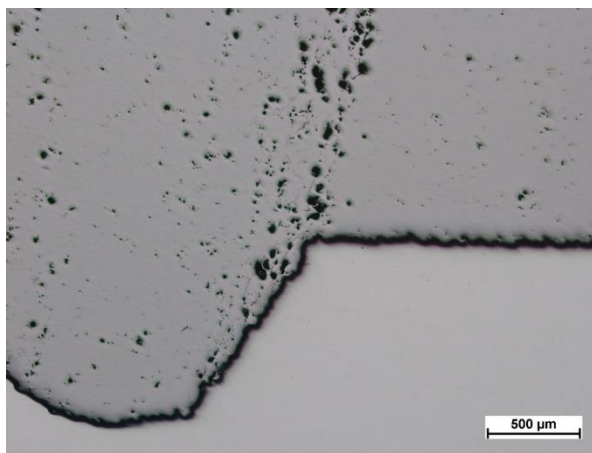


*Obr. 58 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšen nástřik s trhlinami*

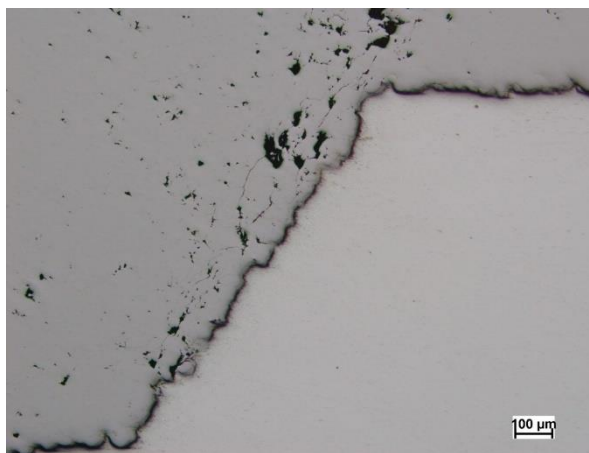
Vyšší porozitu lze sledovat také v nástřiku u sinusové geometrie. Adheze částic je podle snímků kvalitní, a navíc dochází k mírnému promíchání nástřiku a substrátu, což je patrné na snímku zvětšeného rozhraní (viz Obr. 56).

3.3.2.3 Trojúhelníková geometrie

- **Kolmo ke směru nástřiku**

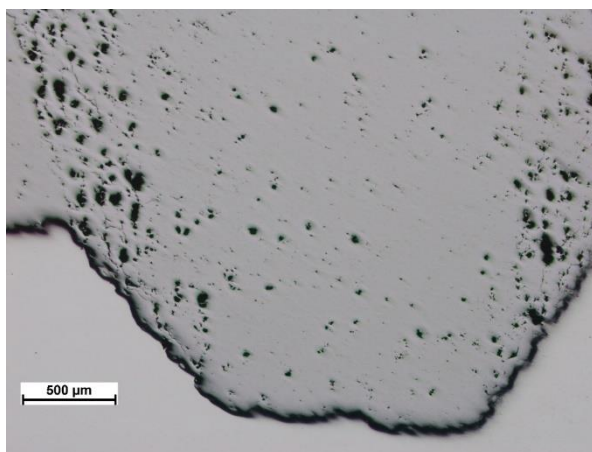


*Obr. 59 Kolmo ke směru nástřiku,
50x zvětšena drážka*

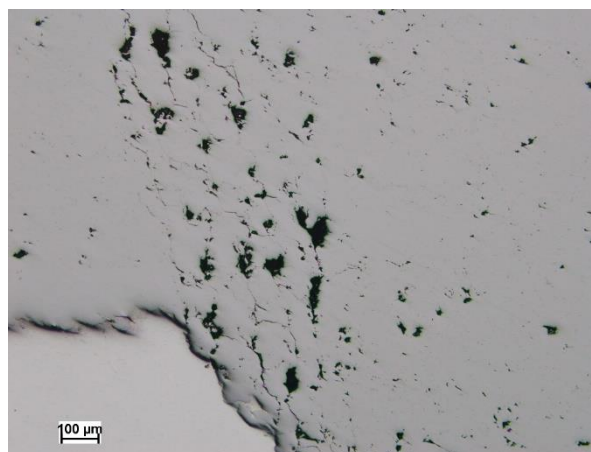


*Obr. 60 Kolmo ke směru nástřiku,
100x zvětšena hrana drážky*

- **Rovnoběžně se směrem nástřiku**



*Obr. 61 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
50x zvětšena drážka*



*Obr. 62 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšena hrana drážky*

Porozita u těchto vzorků je v celém objemu nástřiku. Opět dochází ke spojování pórů trhlinami. Kvalita rozhraní v obou případech je dobrá, není výrazně narušena porozitou.

3.3.3 Tahové zkoušky

Z každé geometrie byly provedeny minimálně 2 tahové zkoušky a jejich výsledky jsou zobrazeny v tabulce Tab. 3. Záznamy a snímky z průběhu tahových zkoušek jsou uvedeny dále v podkapitolách geometrií.

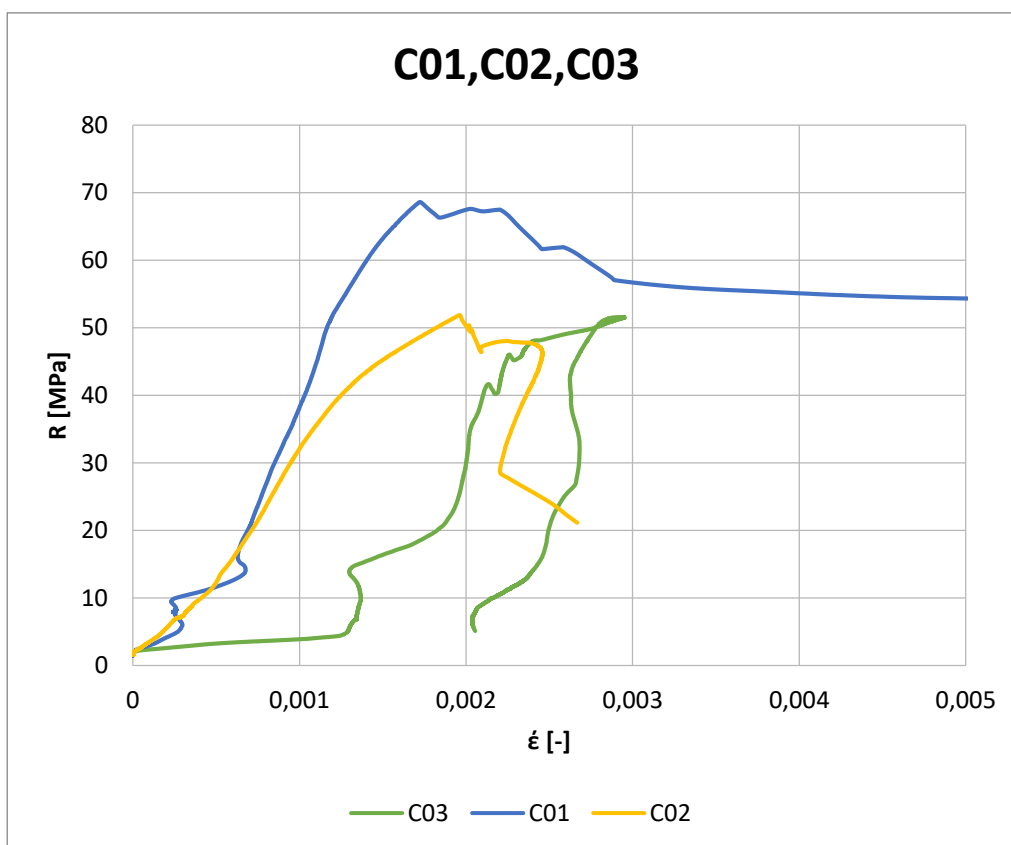
Vzorek	S₀ mm²	E GPa	R_m MPa	A %
C 01	32,47	45,61	68,60	2,24
C 02	33,21	40,92	51,87	0,19
C 03	35,72	28,83	51,58	0,09
T 01	29,08	57,86	59,69	0,22
T 02	28,17	58,88	73,13	0,13
S 01	41,26	22,92	54,50	0,29
S 02	39,76	56,03	67,16	0,31

Tab. 3 Výsledky tahových zkoušek

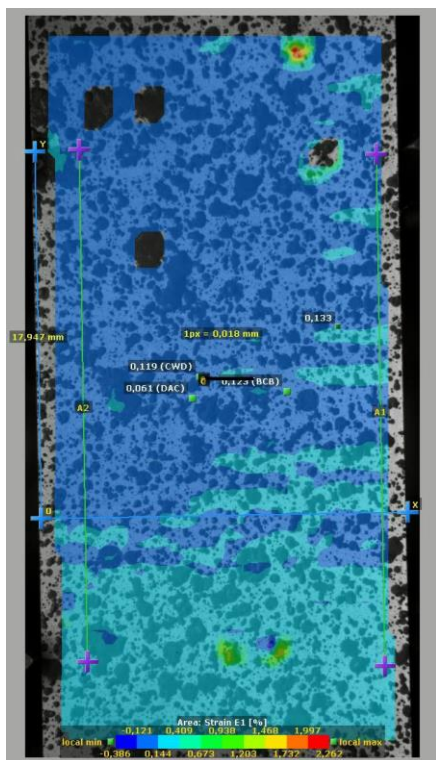
3.3.3.1 Čtvercová geometrie

Mez pevnosti u vzorku se čtvercovou geometrií činí 51,87 MPa a celý průběh zkoušky znázorňuje graf Graf 7. Na snímcích ze záznamu lze vidět, že největší napětí je v pruzích kolmých na směr zatěžování a v pravidelných intervalech (viz Obr. 63). K roztržení vzorku došlo v drážce (viz Obr. 64). Lze také pozorovat, že napětí již minimálně roste i v drážkách rovnoběžných se směrem namáhání (viz Obr. 64).

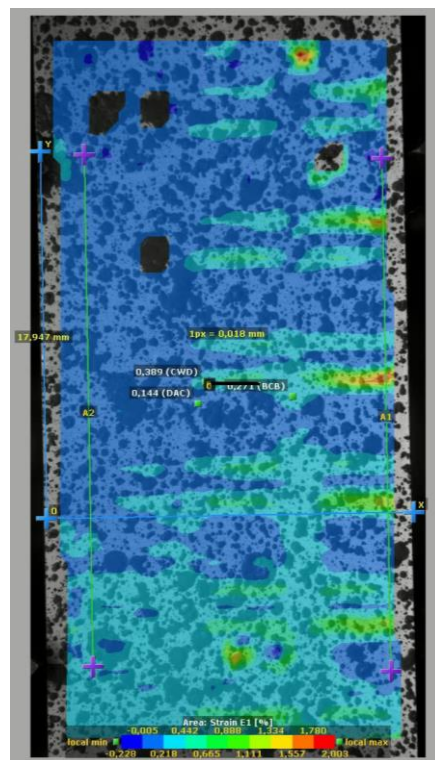
Místo lomu je drážce železa (viz Obr. 65) a lze pozorovat i trhliny v drážkách (viz Obr. 66). Snímky lomových ploch jsou z elektronového mikroskopu na obrázcích Obr. 67 až Obr. 72.



Graf 7 Tahová křivka C02

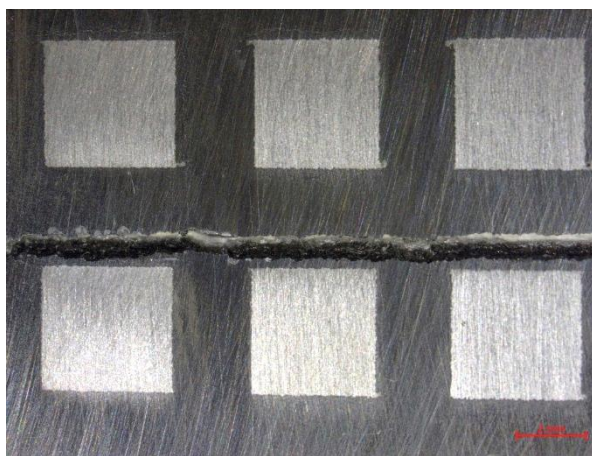


Obr. 63 Koncentrace napětí v C02

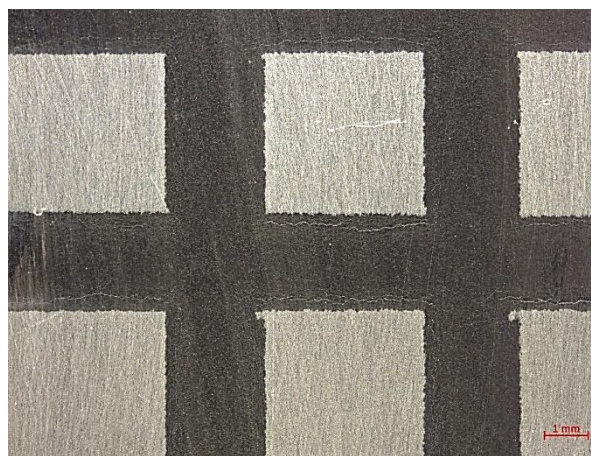


Obr. 64 Napětí v C02 před lomem

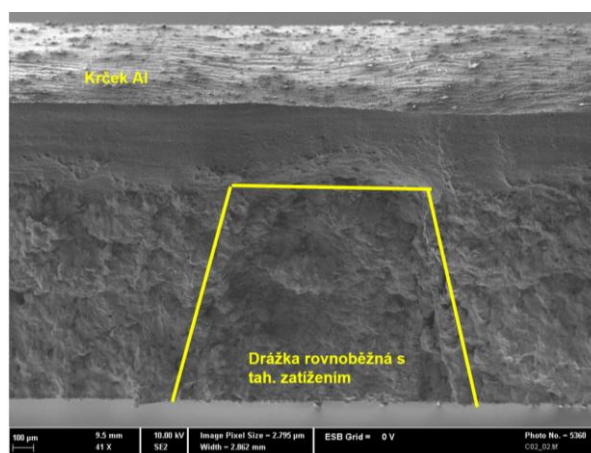
Dále se zkoumala lomová plocha, kterou znázorňují obrázky (viz Obr. 67 až Obr. 72).



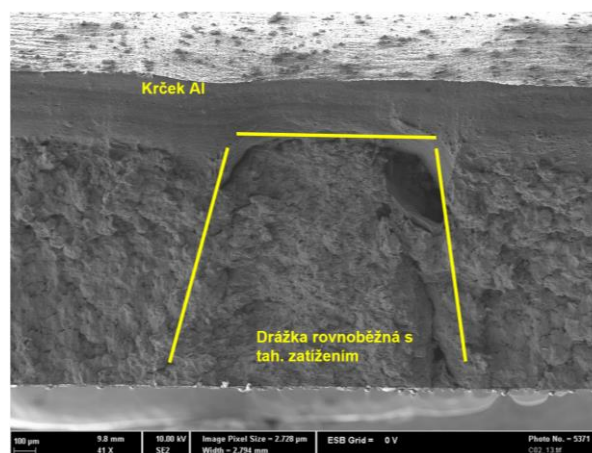
Obr. 65 Místo lomu C01



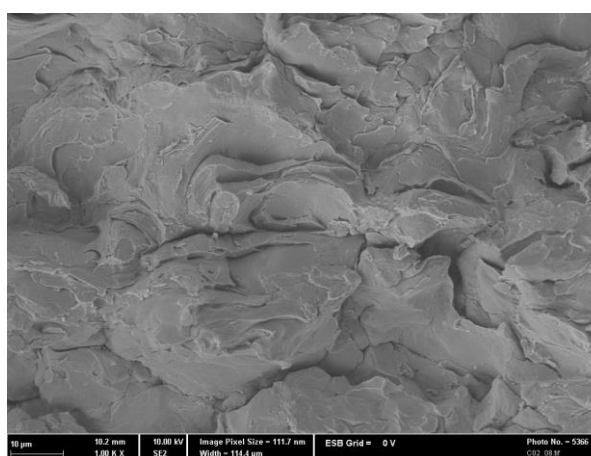
Obr. 66 Místa vzniku trhlin v C01



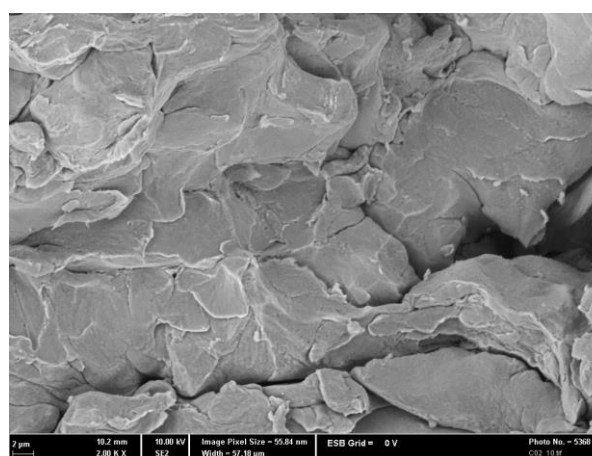
Obr. 67 Lom C02



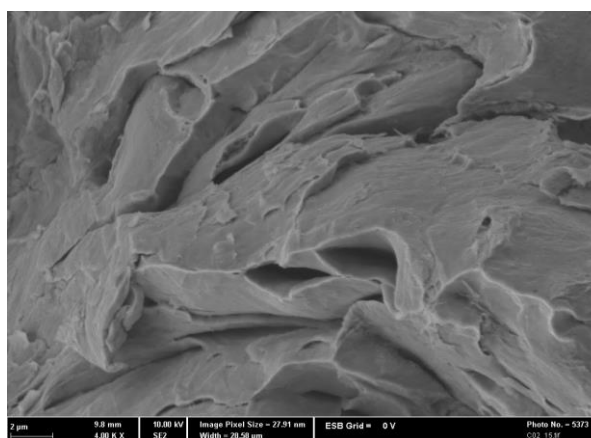
Obr. 68 Lom 2 C02



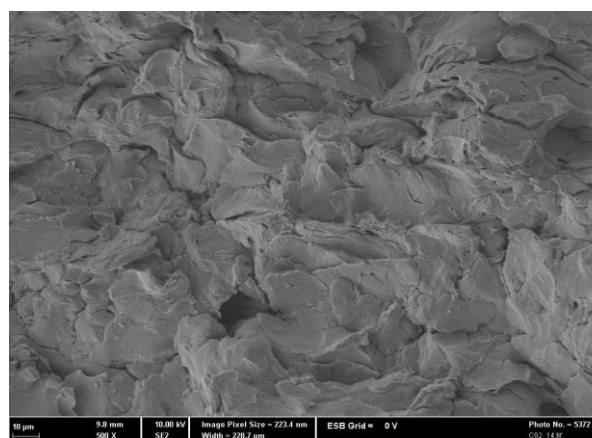
*Obr. 69 Lomová plocha uvnitř drážky C02,
1 000x zvětšena*



*Obr. 70 Lomová plocha uvnitř drážky C02,
2 000x zvětšena*



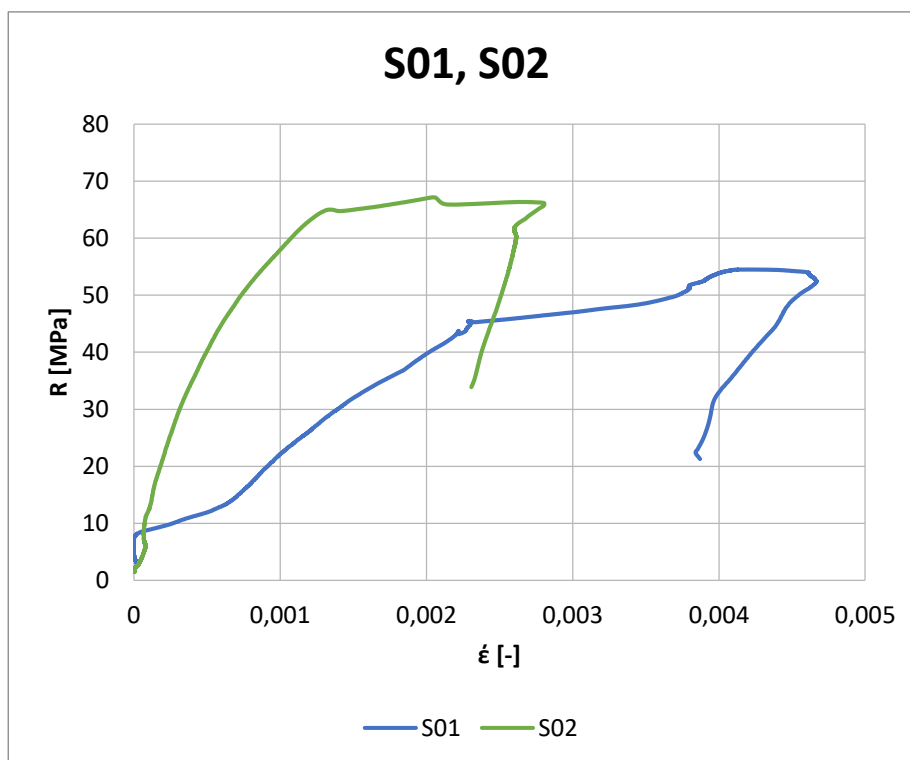
*Obr. 71 Lomová plocha uvnitř drážky 2
v C02, 4 000x zvětšena*



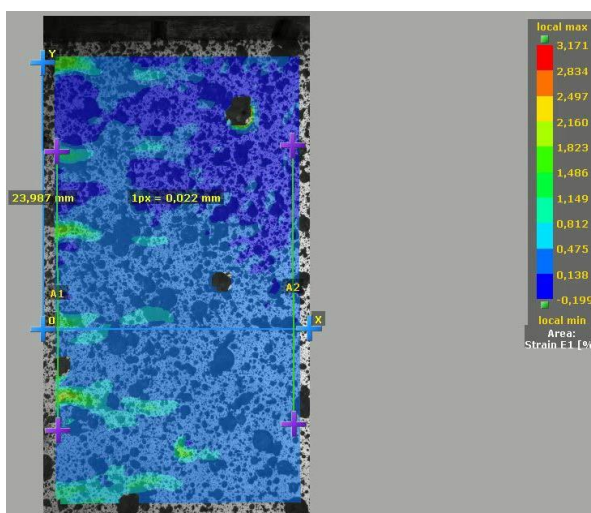
*Obr. 72 Lomová plocha uvnitř drážky 2
v C02, 500x zvětšena*

3.3.3.2 Sinusová geometrie

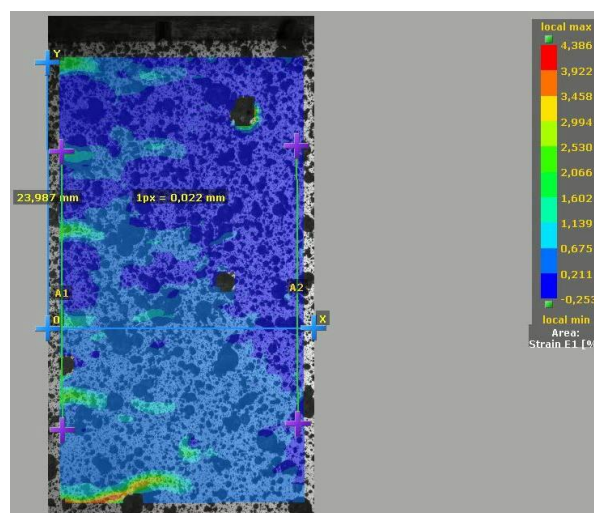
U sinusové geometrie byly vyhodnocovány dva vzorky a záznam zkoušek je na grafu Graf 8. Hodnoty meze napětí se liší zhruba o 13 MPa. Jak lze pozorovat na snímcích ze zkoušek (viz Obr. 73 až Obr. 76) největší koncentrace napětí u obou vzorků byly v minimech a maximech sinusových křivek. Lom, jako v ostatních případech, se uskutečnil podél geometrie, v tomto případě podél sinusové (viz Obr. 77 a Obr. 82). Snímky lomových ploch jsou z elektronového mikroskopu na obrázcích Obr. 78 až Obr. 72.



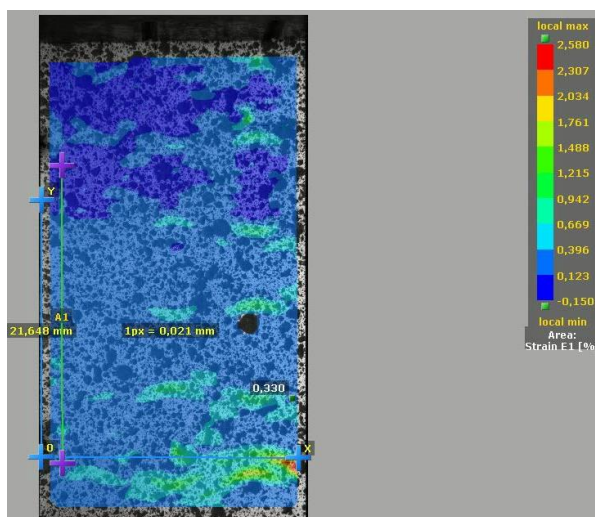
Graf 8 Tahové křivky S01 a S02



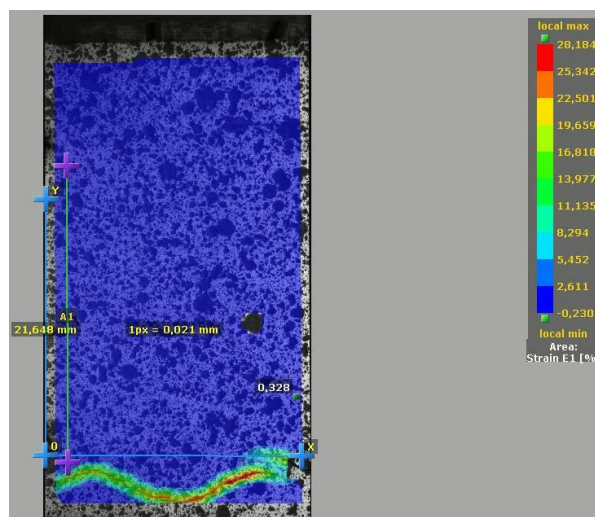
Obr. 73 Koncentrace napětí v S01



Obr. 74 Napětí v S01 před lomem



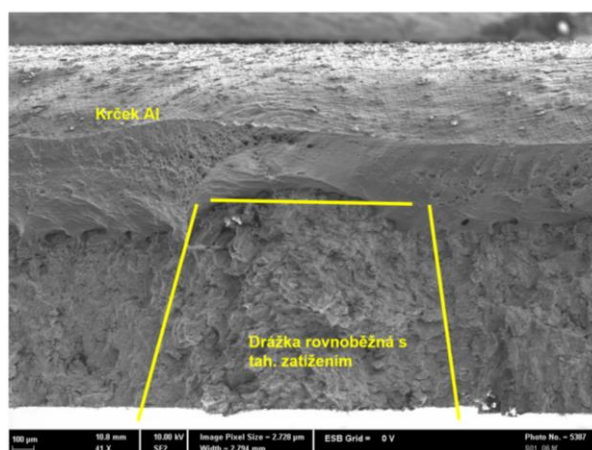
Obr. 75 Koncentrace napětí v S02



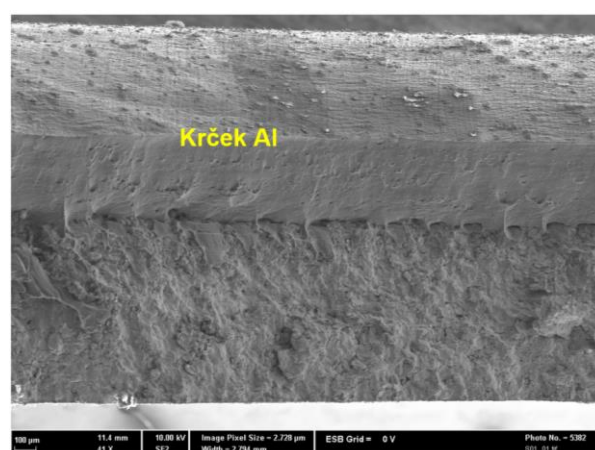
Obr. 76 Napětí v S02 před lomem



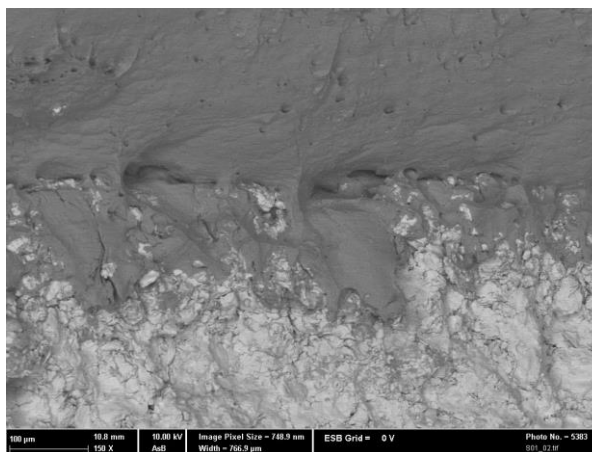
Obr. 77 Místo lomu S01



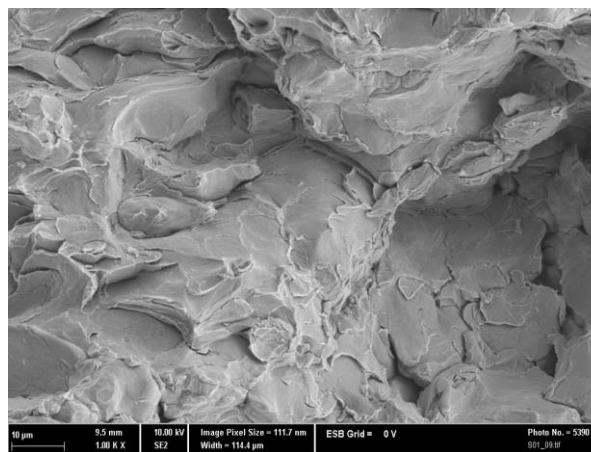
Obr. 78 Lom S01



Obr. 79 Krček Al v S01



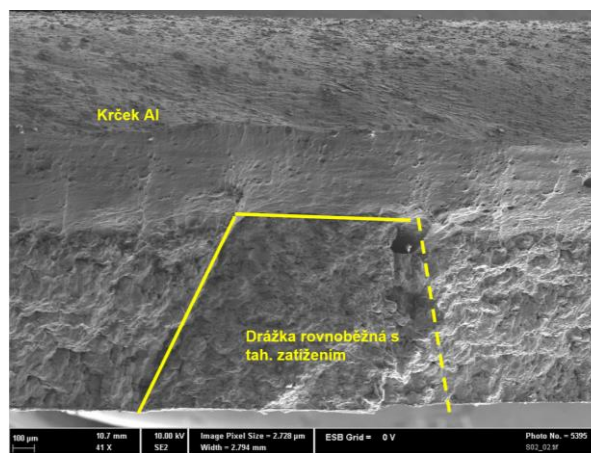
Obr. 80 Detail rozhraní Al-Fe S01 v BSE



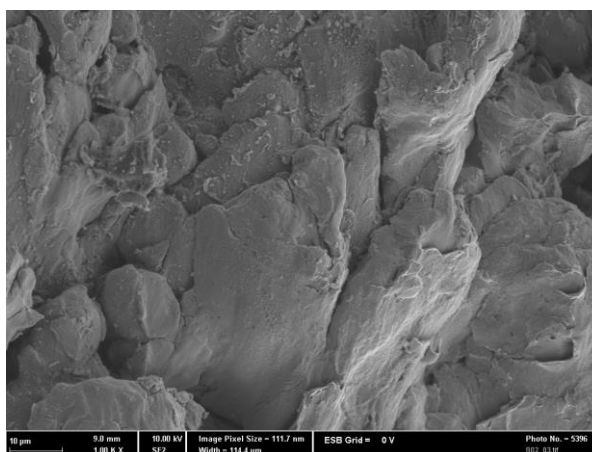
Obr. 81 Lomová plocha uvnitř drážky v S01



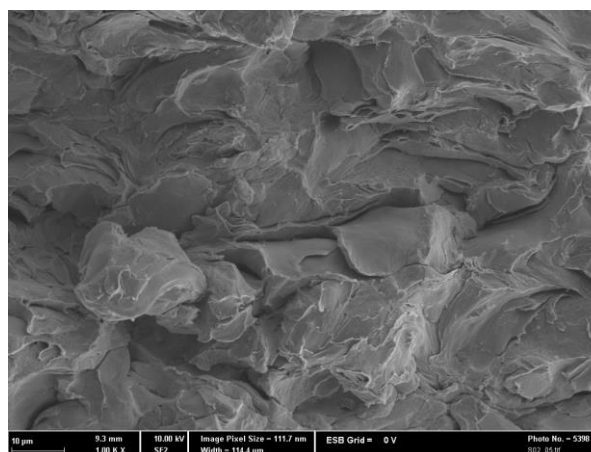
Obr. 82 Místo lomu S02



Obr. 83 Lom S02



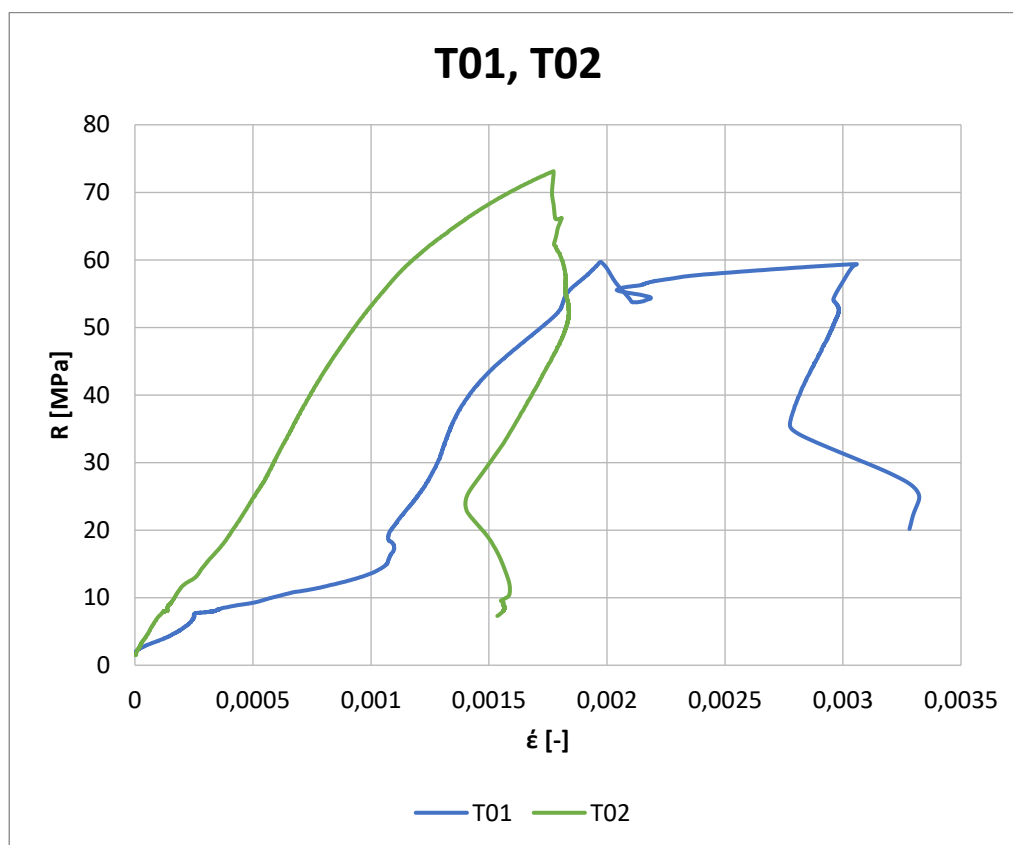
Obr. 84 Místo lomu mimo drážku z místa lomu S02 s oxidy



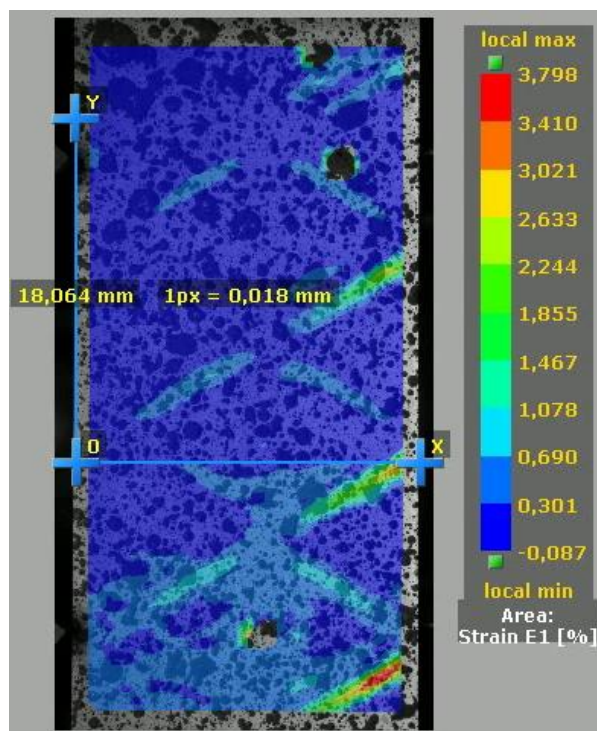
Obr. 85 Místo lomu v drážce S02

3.3.3.3 Trojúhelníková geometrie

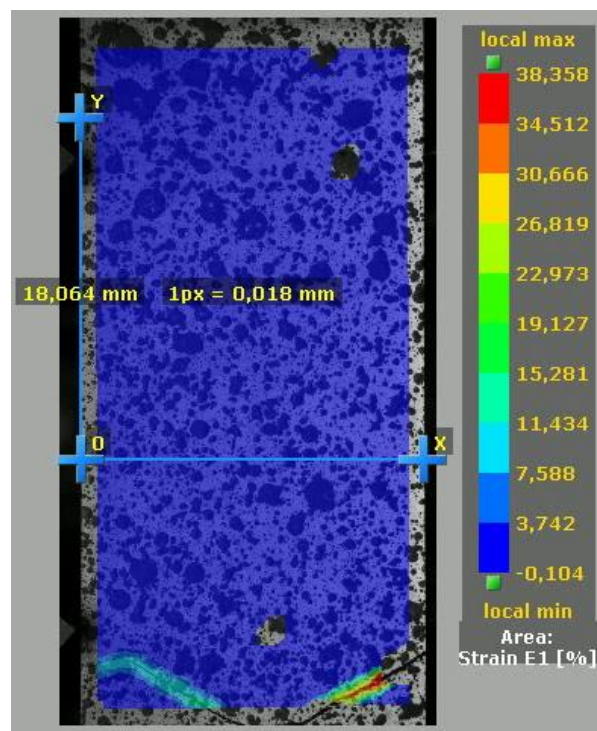
Na tahovou zkoušku byly použity dva vzorky s trojúhelníkovou geometrií a průběhy zkoušek znázorňuje graf Graf 9. Obdobně jako u předchozích případů dochází ke koncentraci napětí v geometrii drážek. V případě trojúhelníkové geometrie jsou největší hodnoty napětí naměřeny na stranách pod úhlem vůči směru namáhání (viz Obr. 86 až Obr. 89). Rozdíl mezi pevností činí cca 15 MPa.



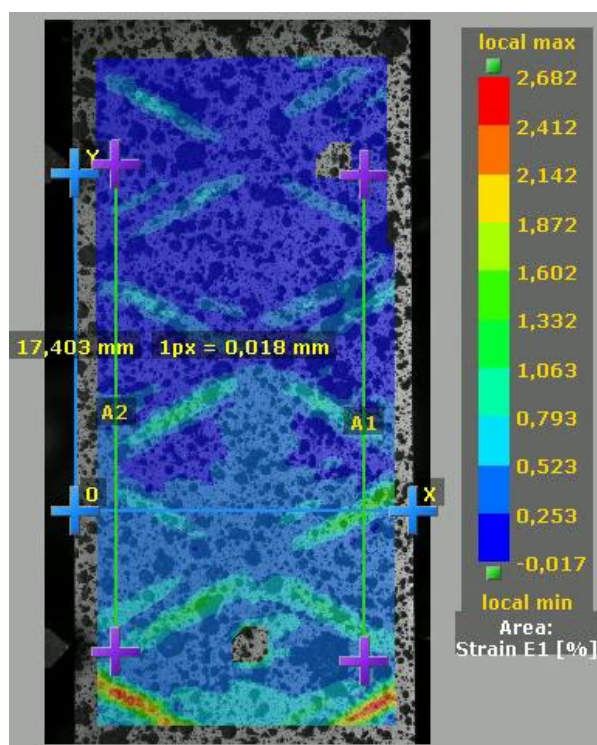
Graf 9 Tahové křivky T01 a T02



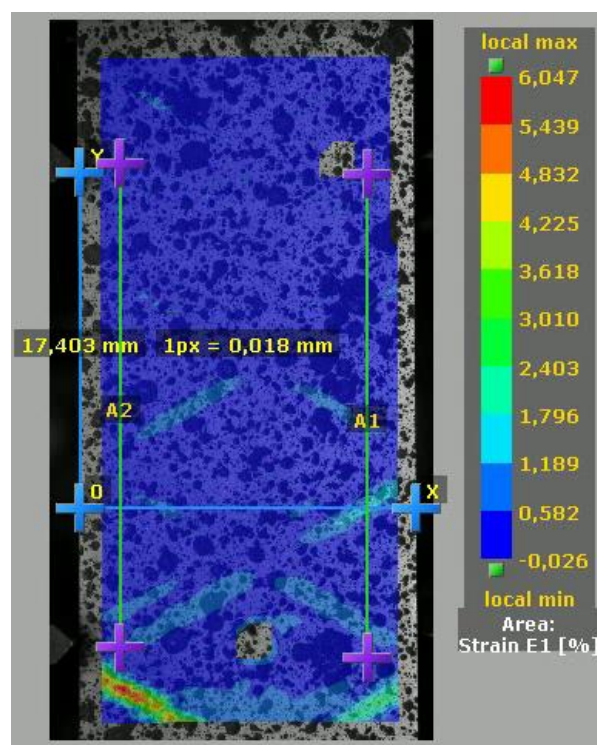
Obr. 86 Koncentrace napětí v T01



Obr. 87 Napětí v T01 před lomem



Obr. 88 Koncentrace napětí v T02

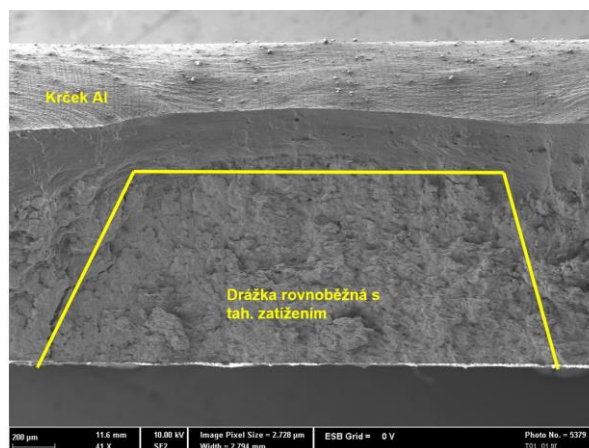


Obr. 89 Napětí v T02 před lomem

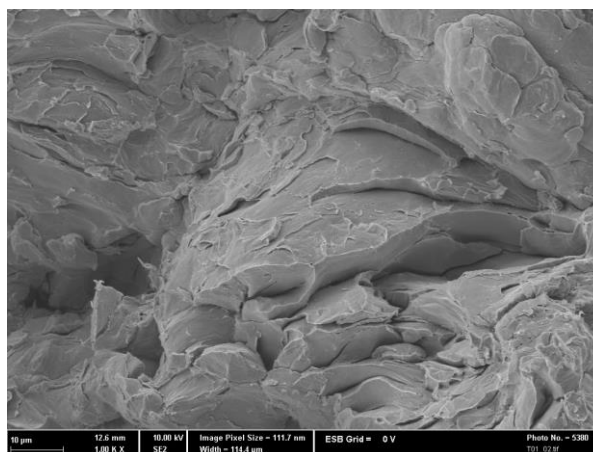
Místo lomu vzorku T01 je na obrázku Obr. 90 a místo lomu vzorku T02 je podobné jako u T01 a je na obrázku Obr. 94 a na obrázku Obr. 95 lze vidět vznik trhlin. Lom a lomové plochy po zkoušce lze pozorovat na obrázcích Obr. 91 až Obr. 93.



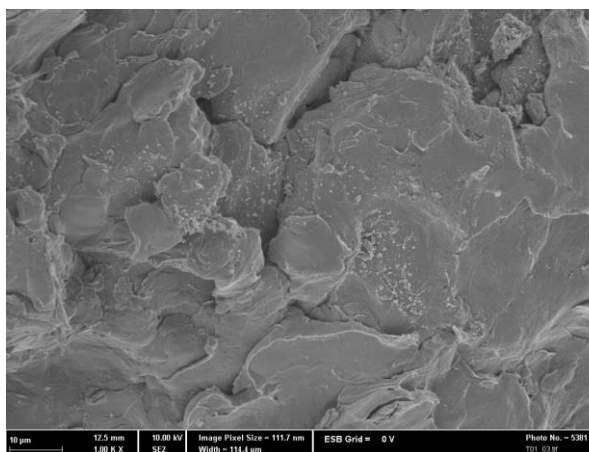
Obr. 90 Místo lomu T01



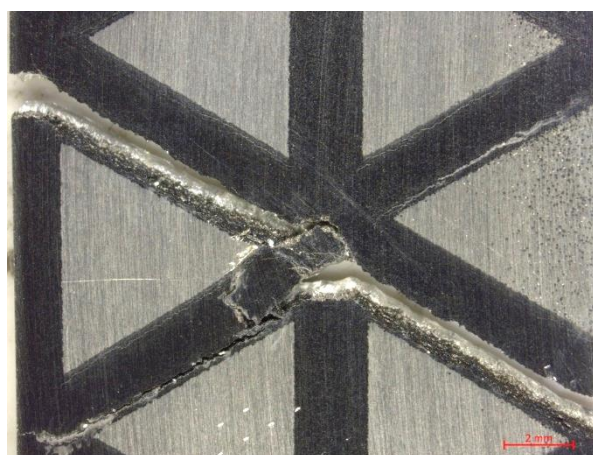
Obr. 91 Lom T01



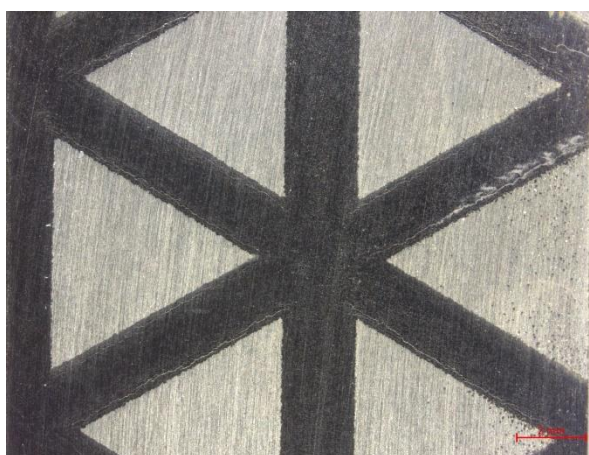
Obr. 92 Lomová plocha uvnitř drážky T01



Obr. 93 Místo lomu mimo drážku z T01 s oxidy



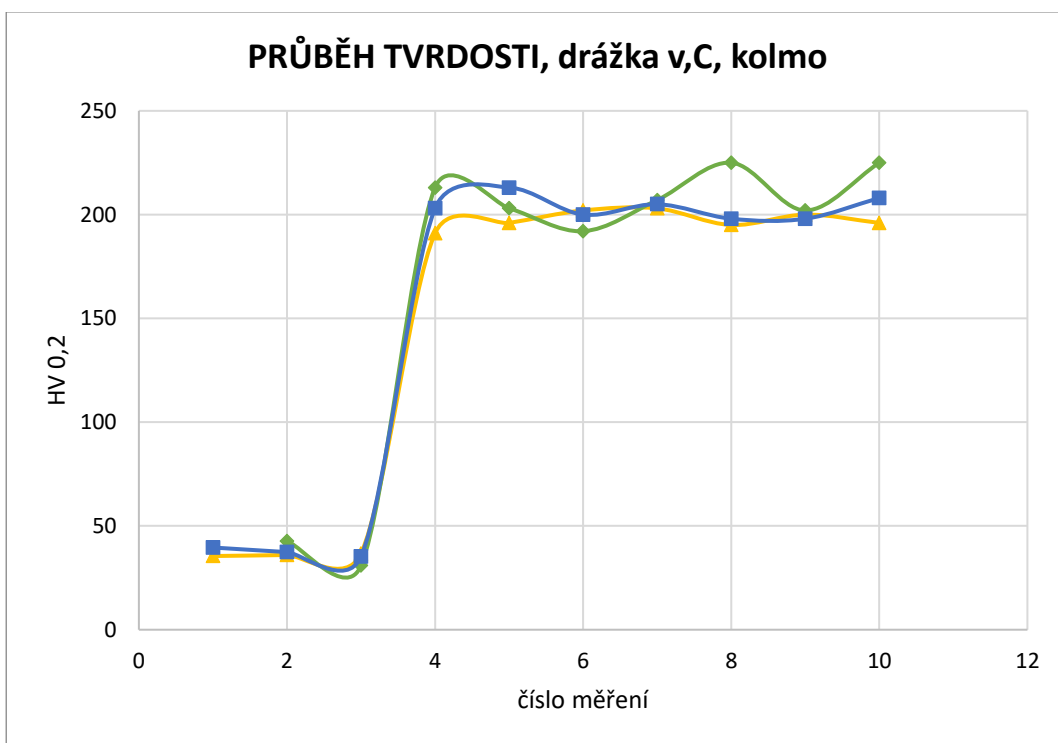
Obr. 94 Místo lomu T02



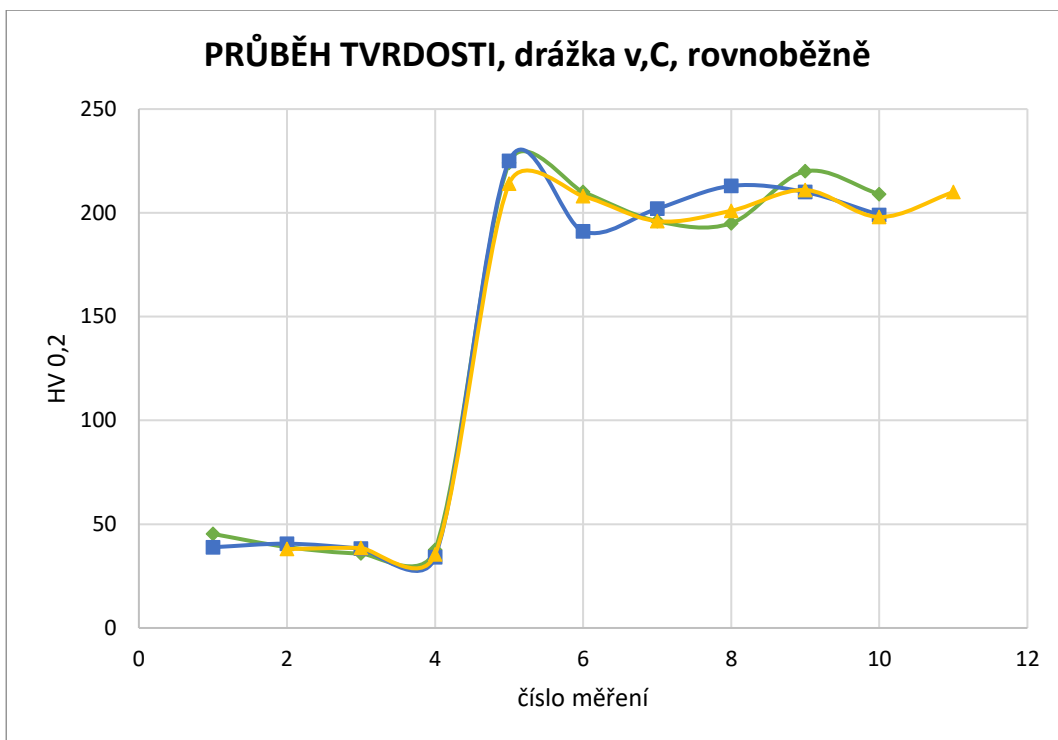
Obr. 95 Místa šíření trhlin v T02

3.3.4 Měření tvrdosti

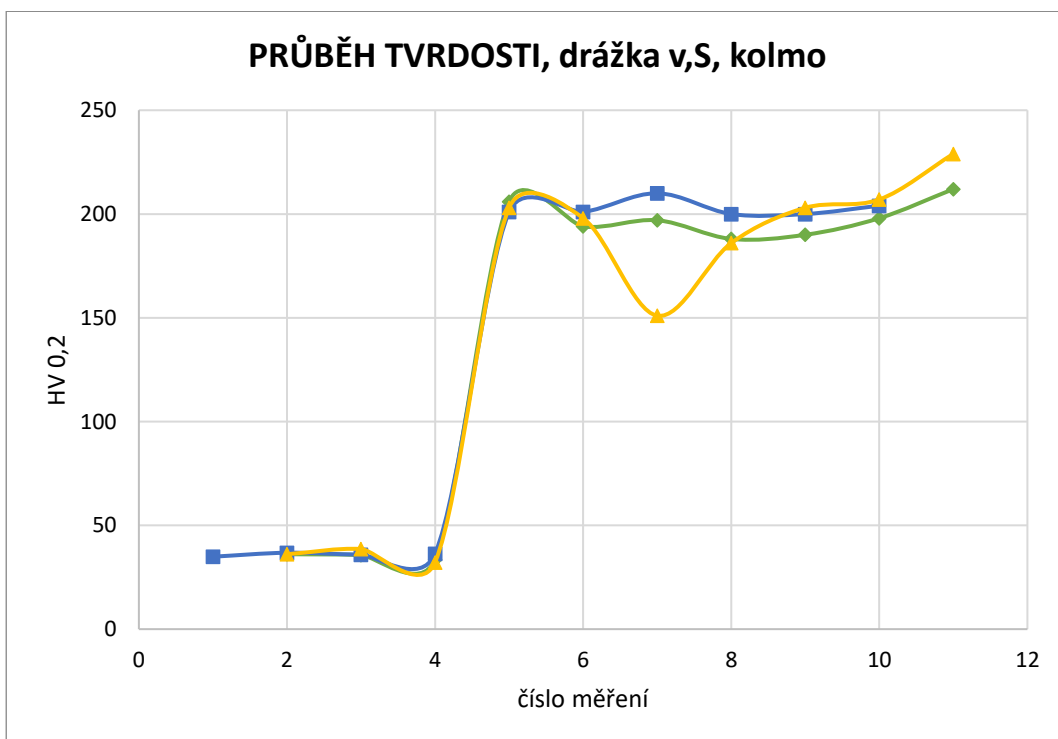
Výsledky z měření tvrdosti jsou uvedeny v grafech Graf 10 až Graf 15. označení v grafech je následující: drážka v značí drážku lichoběžníkového profilu, písmeno C znamená čtvercovou geometrii, S je sinusová geometrie a T je trojúhelníková geometrie a jako poslední je uveden směr k nástřiku, ve kterém tvrdost byla měřena.



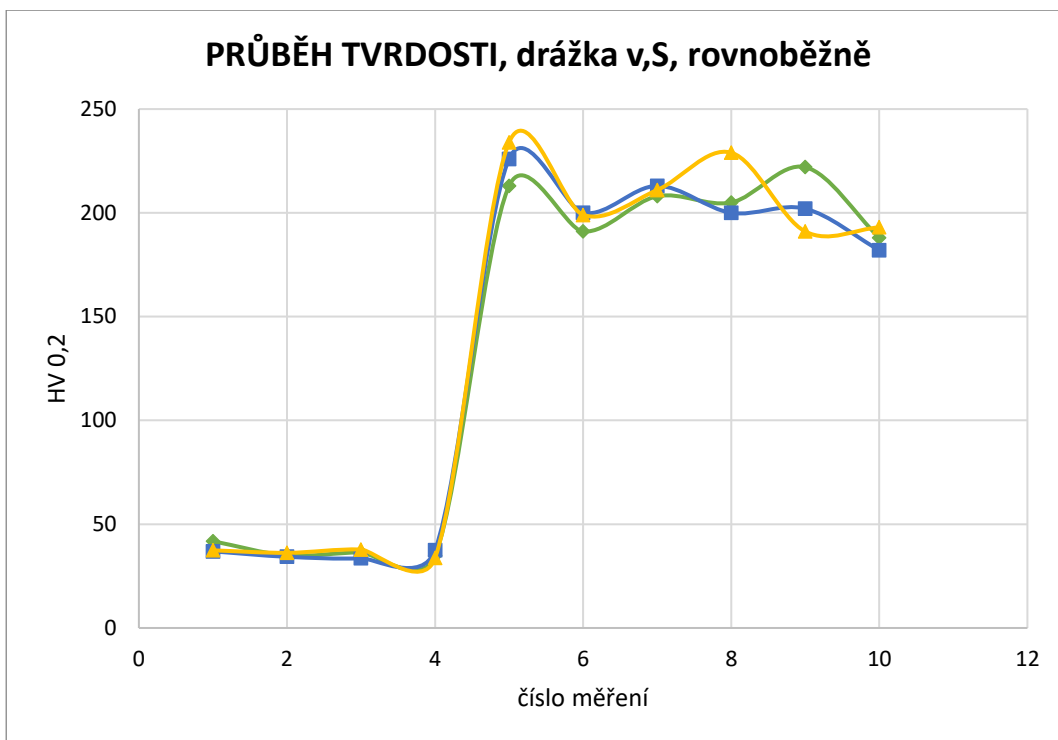
Graf 10 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, C geometrie, kolmo



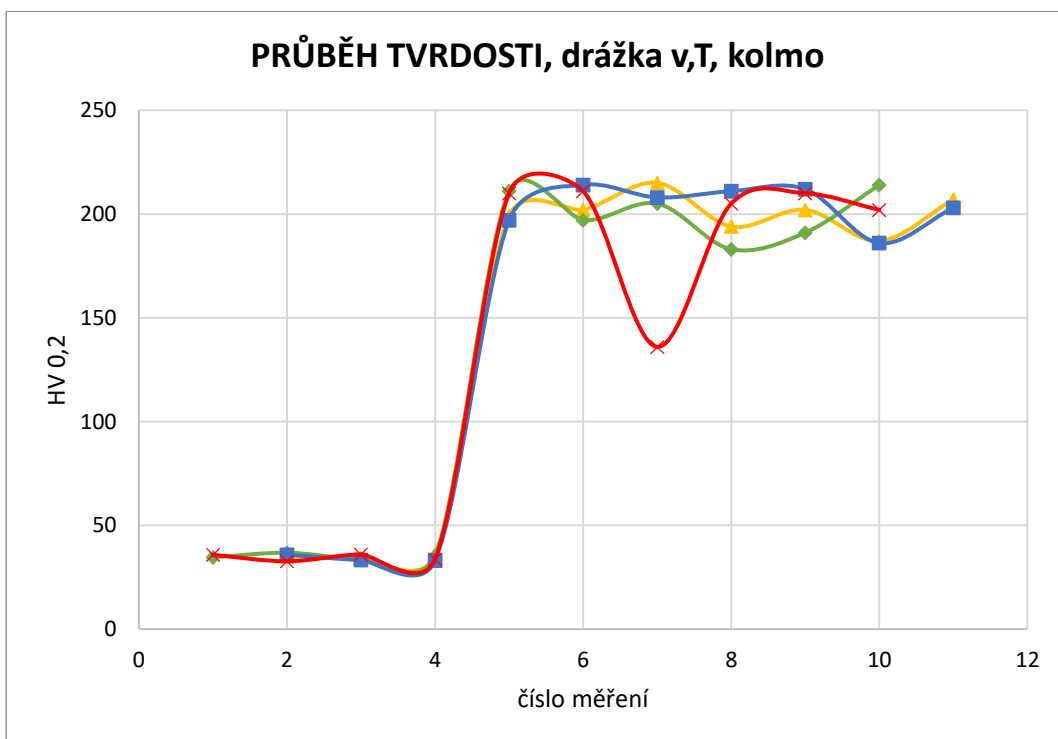
Graf 11 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, C geometrie, rovnoběžně



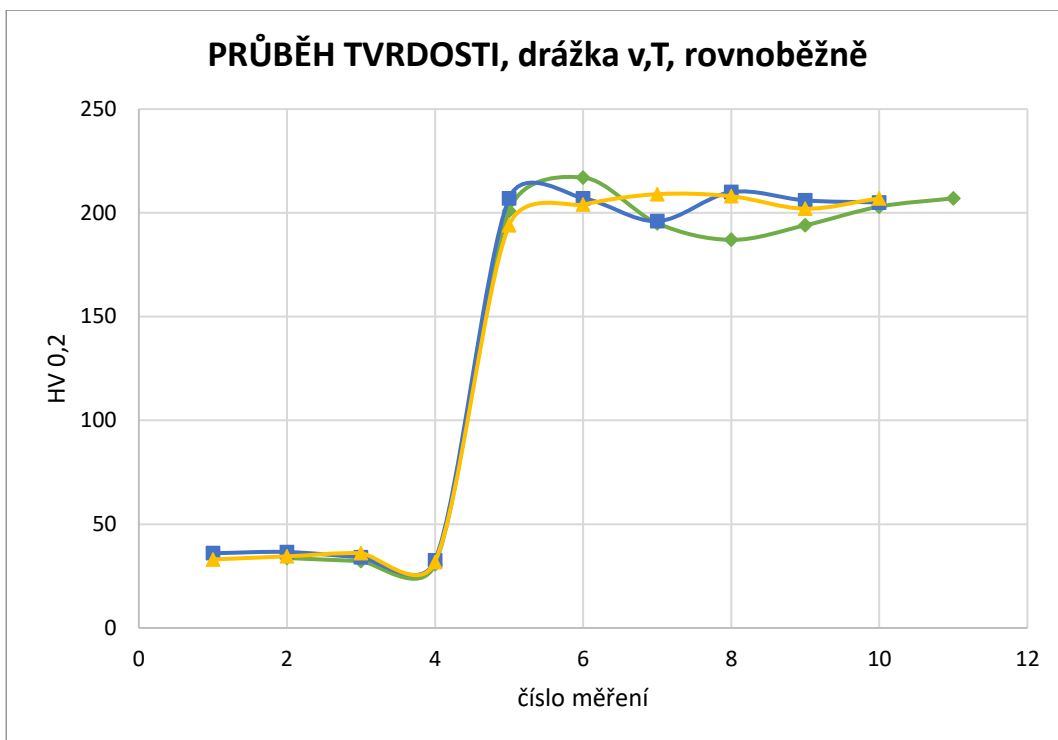
Graf 12 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, S geometrie, kolmo



Graf 13 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, S geometrie, rovnoběžně



Graf 14 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, T geometrie, kolmo



Graf 15 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, T geometrie, rovnoběžně

Tvrdost HV 0,2 pro železo		
Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo
drážka v, T	203,11	200,46
drážka v, C	206,95	203,57
drážka v, S	205,94	198,90

Tab. 4 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Fe

Tvrdost HV 0,2 pro hliník		
Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo
drážka v, T	33,74	34,71
drážka v, C	38,32	36,76
drážka v, S	36,28	35,61

Tab. 5 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Al

Z průběhů tvrdosti u všech geometrií s typem lichoběžníkové drážky je vidět, že průběh tvrdosti hliníku je téměř konstantní. Je jen s malými odchylkami, což se dalo očekávat. V tomto případě se jedná o tvářený hliník, kde by se tvrdost neměla měnit. Tvrdost je ale odlišná v závislosti na směr stříkání CS (viz Tab. 5), což je pravděpodobně způsobeno směrem a typem tváření hliníku (případně jeho výrobou). Tvrdost železa se pohybuje kolem 200 HV 0,2 a je závislá na směru stříkání CS (viz Tab. 4). Tvrdost železa je vyšší ve směru stříkání CS zhruba o 3-5 HV 0,2 a její průběh není konstantní, což je zřejmě způsobeno pórovitostí nástřiku železa.

3.4 Třetí experiment

Třetí experiment obsahoval pouze čtvercovou geometrii drážky a byl vytvořen odlišným způsobem od předchozích vzorků.

Nejprve se vytvořila vrstva hliníku pomocí cold spray. Následně se mezi stříkací pistol a vytvořenou vrstvu hliníku vložila mřížka (viz Obr. 96 a Obr. 97), přes kterou byl proveden další nástřik, pomocí kterého vznikla geometrie drážek (viz Obr. 99). Nanášení hliníku cold sprayem bylo za teploty 600 C° při tlaku 35 bar a nosným plynem byl dusík. Částice Al ulpěly na mřížce a zabránily vzniku kontinuální vrstvy (viz Obr. 98). Posledním krokem bylo odstranění mřížky a nanesení Fe vrstvy na hliníkovou matrici (viz Obr. 100). Pro nanášení železa cold sprayem byl jako nosný plyn použit dusík, železo bylo stříkáno za teploty 900 C° při tlaku 50 bar. Mřížku tvořil drát o průměru 1 mm a byla vzdálena 15 mm od substrátu, na který se nanášel hliník.



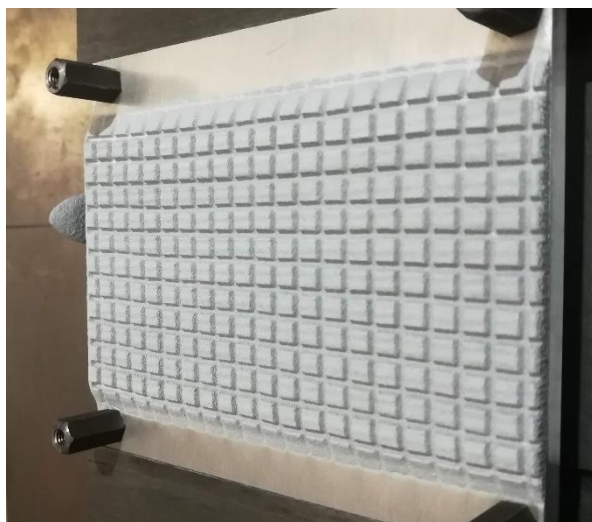
Obr. 96 Substrát s mřížkou před stříkáním



Obr. 97 Připevněná mřížka před cold spray



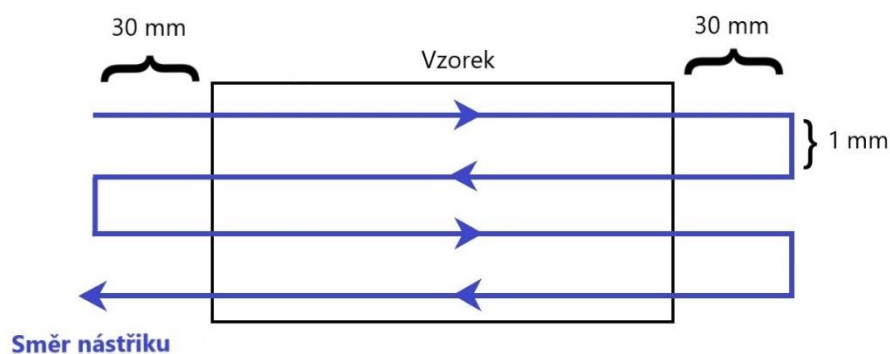
Obr. 98 Substrát s vytvořenými drážkami



Obr. 99 Substrát před nanášením železa



Obr. 100 Hotový vzorek

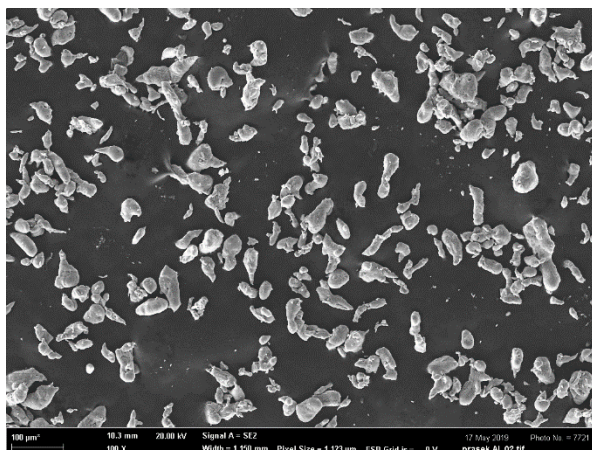


Obr. 101 Podmínky nástřiku CS

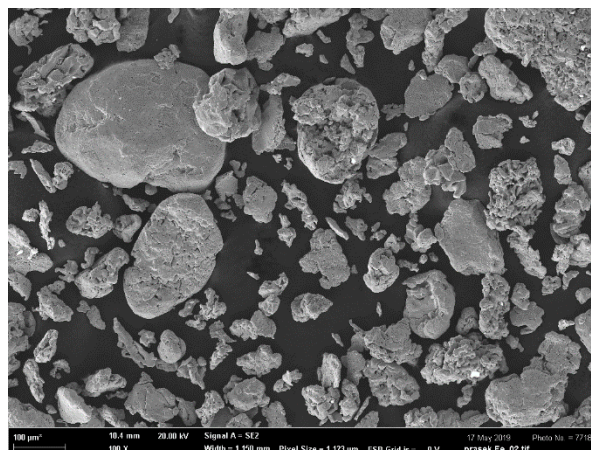
Podmínky během nástřiku cold spray jsou znázorněny na obrázku Obr. 101. Přeběh pistole mimo vzorek byl 30 mm na každé straně, vzdálenost mezi pásy nástřiku byla 1 mm a rychlost posuvu pistole na vzorek byla 250 mm/s.

Vzorek, který byl kompletně vyroben metodou cold spray, byl rozřezán k vytvoření vzorků pro tahovou zkoušku a na vzorky pro pozorování struktury.

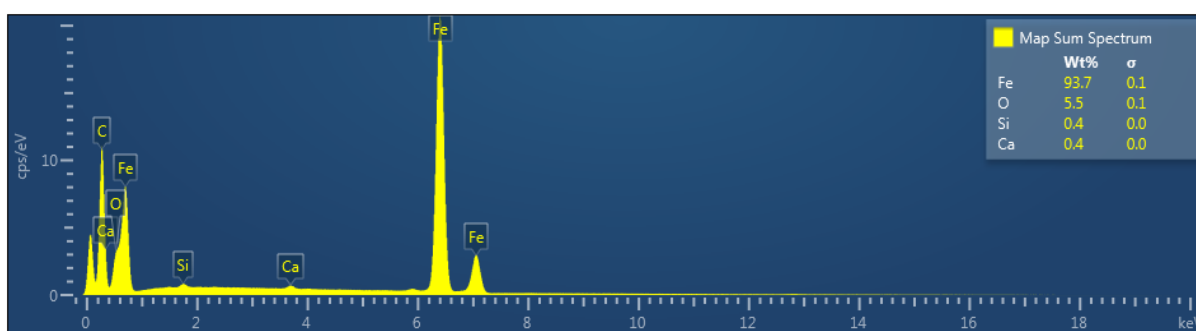
Hliníkový prášek (vyrobený atomizací vodou) byl od firmy GTV Verschleißschutz GmbH a velikost částic byla 20-45 μm s čistotou 99,5 % (viz Obr. 102) [38]. Železný prášek pochází z firmy Alfa Aesar, má čistotu 99 % a částice mají velikost 20 μm (viz Obr. 103) [39, 40]. Po nalezení nečistot v nástřiku železa byla dodatečně provedena chemická analýza železného prášku (viz Obr. 104).



Obr. 102 Prášek hliníku



Obr. 103 Prášek železa

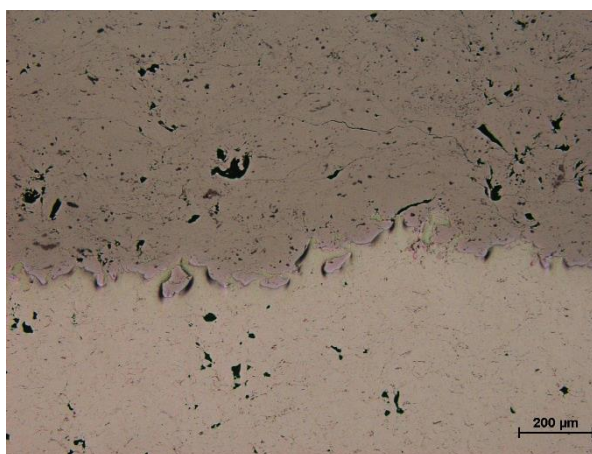


Obr. 104 Chemická analýza železného prášku

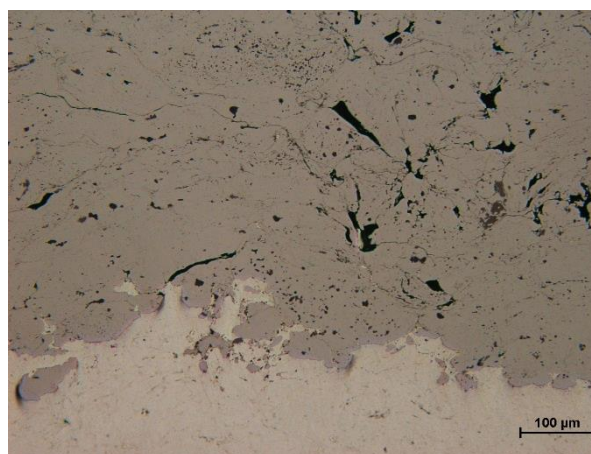
3.4.1 Struktura a rozhraní

Byly pořízeny snímky struktury a rozhraní jak ve směru nanášení prášku, tak kolmo na směr stříkání. Struktury i rozhraní byly velmi podobné a lišily se porozitou nástřiku.

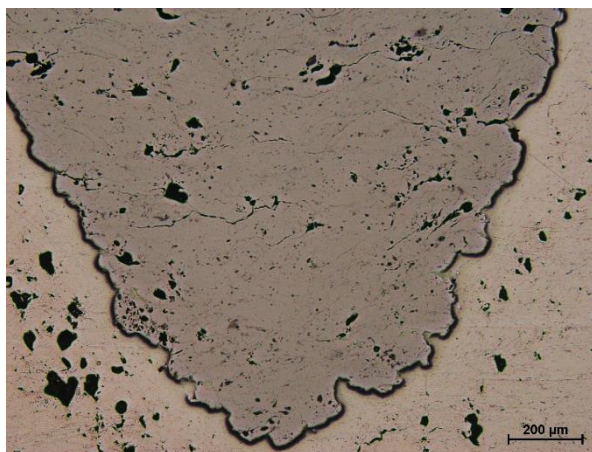
- **Kolmo ke směru nástřiku**



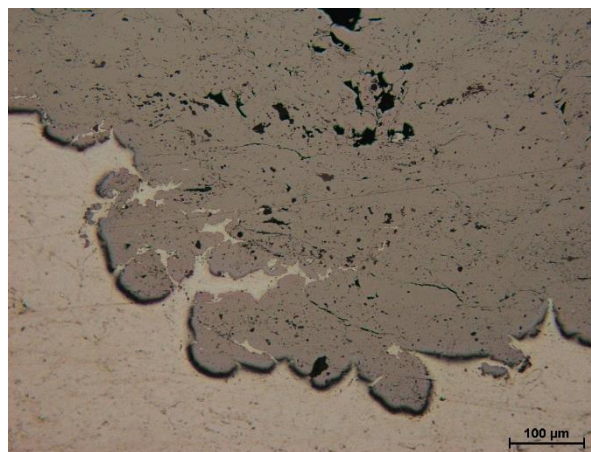
*Obr. 105 Kolmo ke směru nástřiku,
100x zvětšen nástřik*



*Obr. 106 Kolmo ke směru nástřiku,
200x zvětšen nástřik*

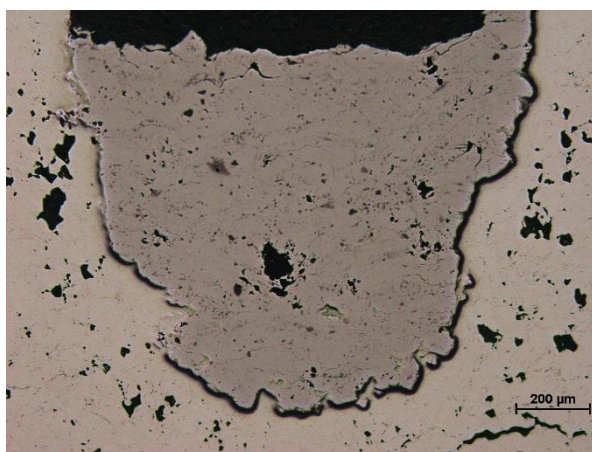


*Obr. 107 Kolmo ke směru nástřiku,
100x zvětšena drážka*

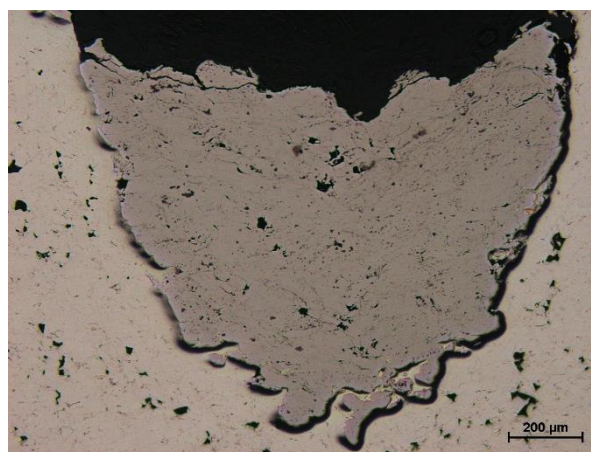


*Obr. 108 Kolmo ke směru nástřiku,
200x zvětšen detail drážky*

- **Rovnoběžně se směrem nástřiku**



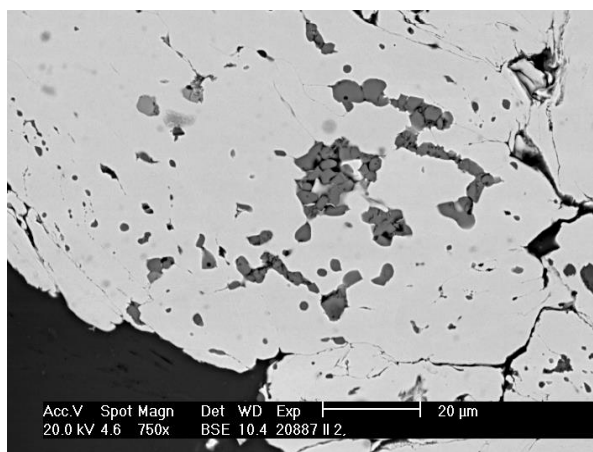
*Obr. 109 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšena drážka 1*



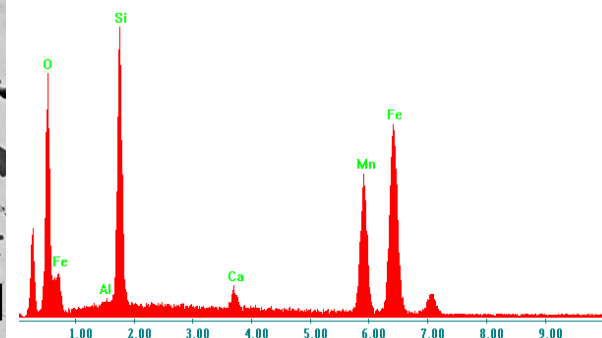
*Obr. 110 Rovnoběžně se směrem nástřiku,
100x zvětšena drážka 2*

Rozhraní je více promícháno a není tak hladké jako v případech tvářeného hliníku. Póry v obou materiálech jsou větší a rozptýlené po celém objemu materiálu.

Po zkoumání vzorků v elektronovém mikroskopu byly objeveny vměstky a nečistoty (viz Obr. 111). Podle analýz muselo dojít k znečištění prášku před nástřikem železného prášku nějakým druhem nečistot skládajících se převážně z křemíku, manganu a kyslíku (viz Obr. 112) a v tabulce Tab. 6 jsou znečišťující prvky uvedeny v procentech v daném místě analýzy. V železném nástřiku se vyskytovaly nečistoty s různým složením.



Obr. 111 Nečistoty v nástríku železa



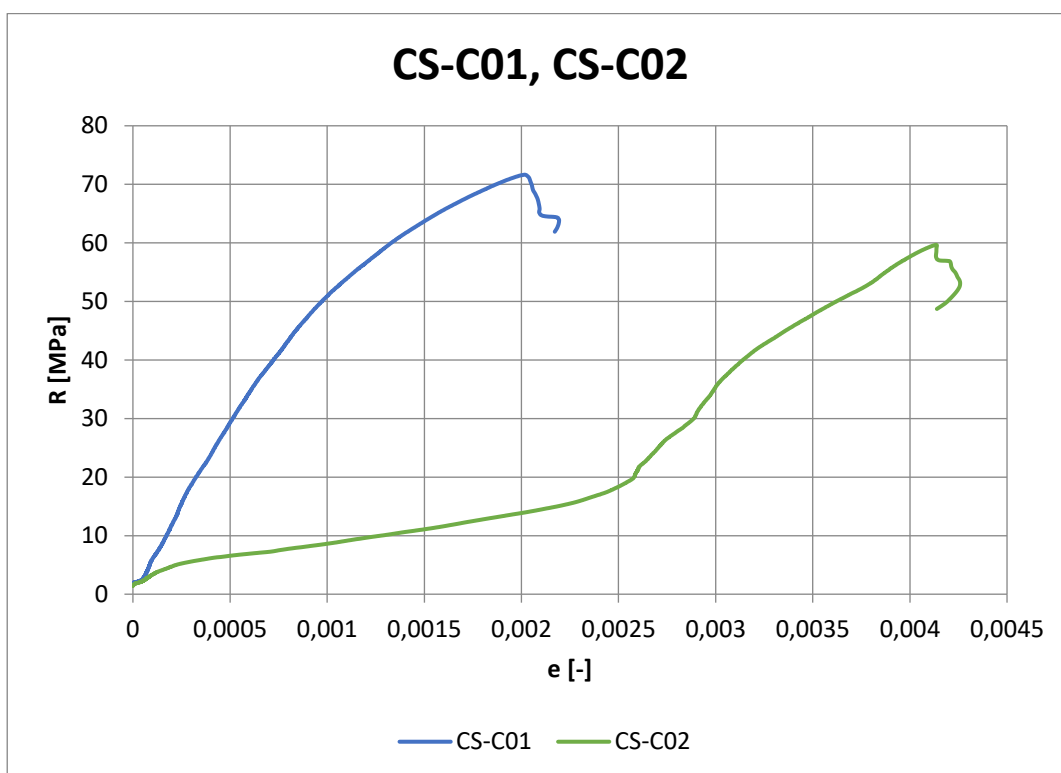
Obr. 112 Chemická analýza nečistot

Prvek	Obj. %	At. %
O	29,76	54,71
Al	0,71	0,78
Si	14,34	15,01
Ca	1,30	0,96
Mn	20,13	10,77
Fe	33,75	17,77

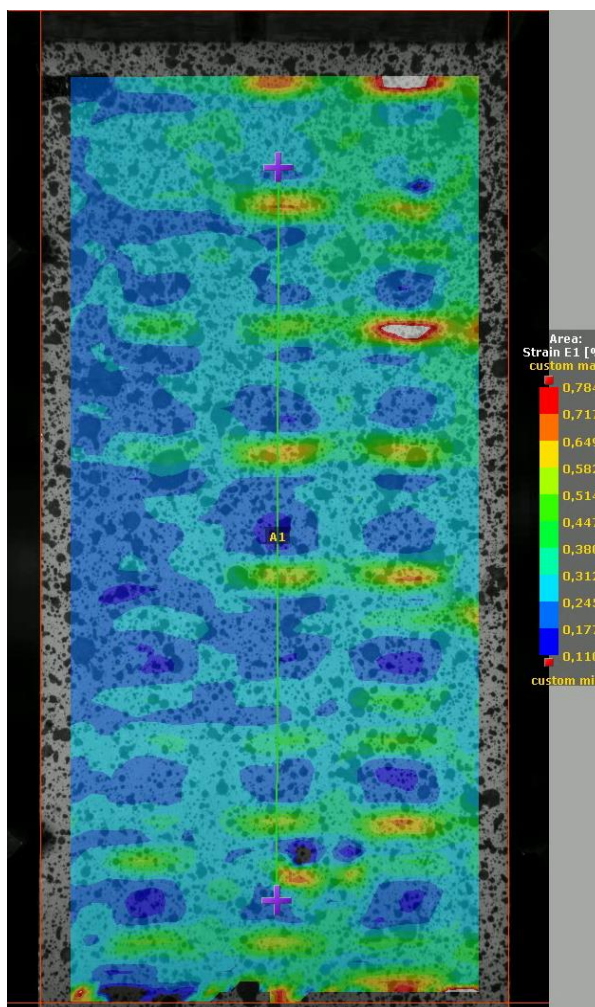
Tab. 6 Složení nečistot v procentech

3.4.2 Tahové zkoušky

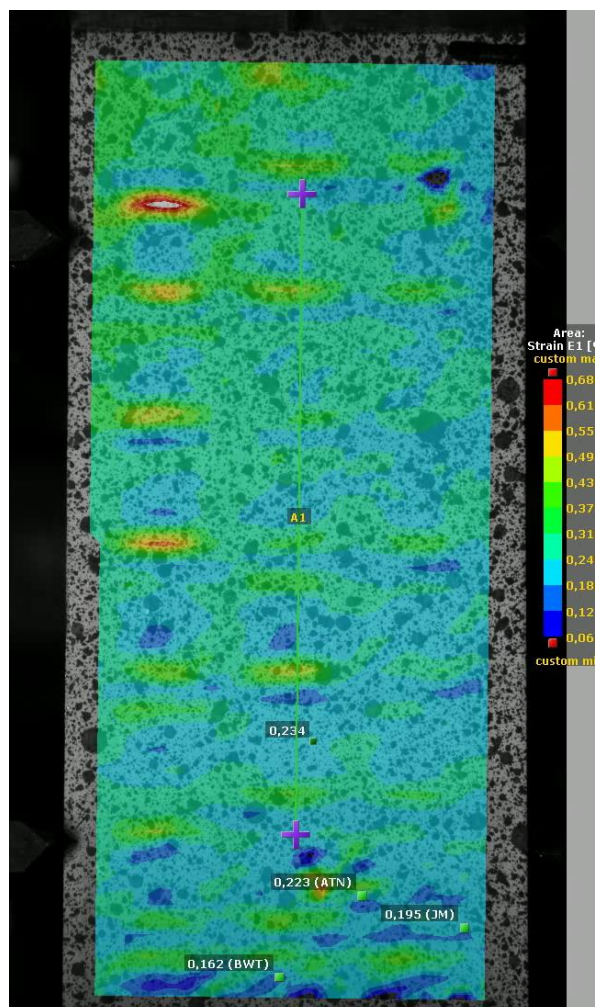
V třetím experimentu byly provedeny dvě takové zkoušky a vzorky měli čtvercovou geometrii. Výsledky z tahových zkoušek jsou v grafu Graf 16. Na snímcích ze záznamů lze vidět, že se zapojují jak drážky kolmé na směr namáhání, tak i drážky rovnoběžné se směrem namáhání. Lze jednoznačně rozeznat čtvercovou geometrii drážek (viz Obr. 113 a Obr. 114). místo lomu proběhlo v hliníkovém substrátu, což značí o vysoké kvalitě rozhraní hliník-železo (viz Obr. 115 a Obr. 116). v tabulce Tab. 7 Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny výsledky z tahových zkoušek. Snímky lomových ploch jsou pořízeny v elektronovém mikroskopu a byly provedeny také chemické analýzy některých nečistot (viz Obr. 117 Obr. 126).



Graf 16 Tahové křivky pro CS-C01 a CS-C02



Obr. 113 Koncentrace napětí v CS -C01



Obr. 114 Koncentrace napětí v CS -C02



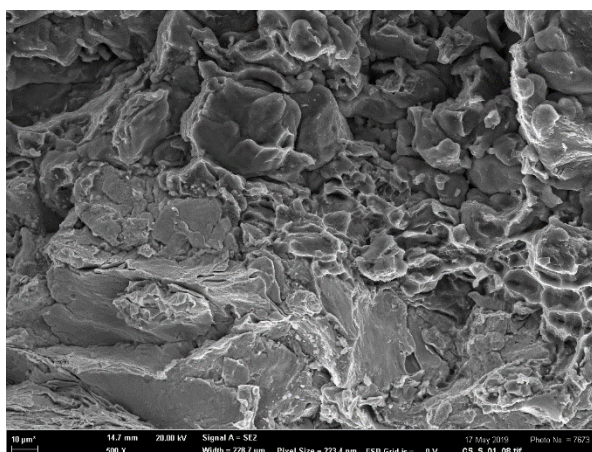
Obr. 115 Místo lomu CS-C01



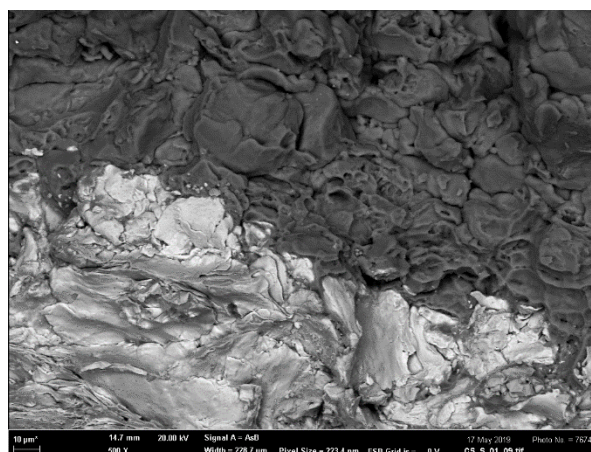
Obr. 116 Místo lomu CS-C02

Specimen ID	S ₀ mm ²	E GPa	R _m MPa	A %	A _t %
CS-C-01	44,69722	63,33189	71,64604	0,118414	0,21717
CS-C-02	39,55927	35,46188	67,41495	0,067399	0,413839

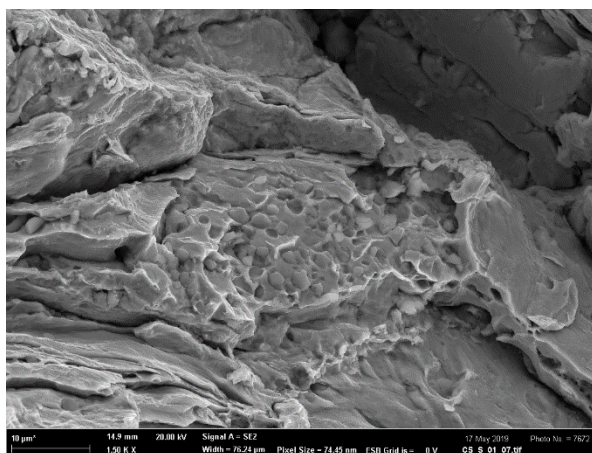
Tab. 7 Výsledky tahových zkoušek



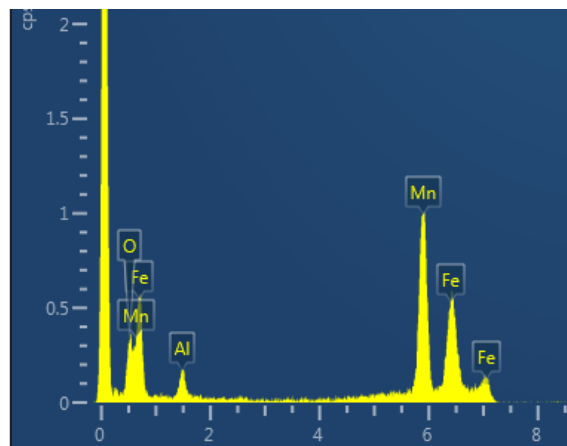
Obr. 117 Lomová plocha rozhraní
hliník-železo



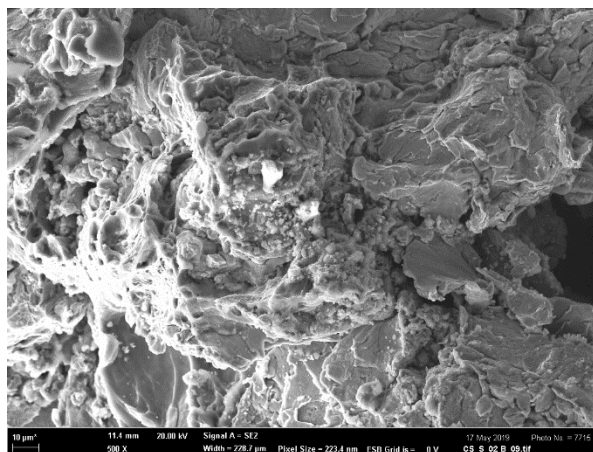
Obr. 118 Rozhraní hliník-železo



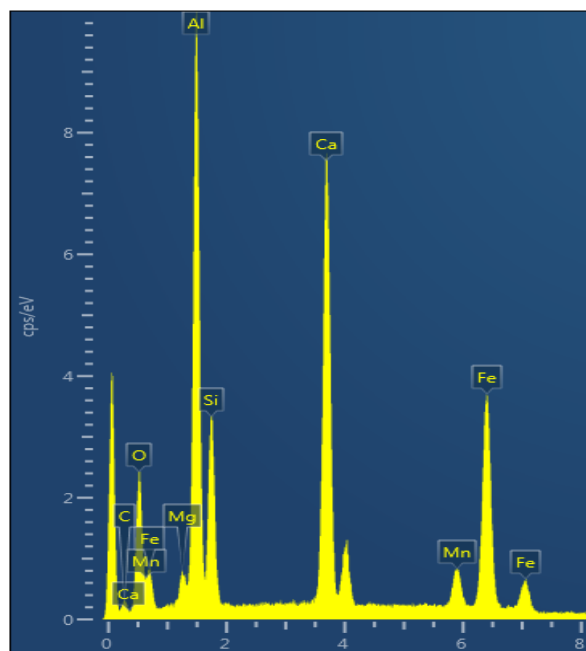
Obr. 119 Kulaté nečistoty v nástřiku železa



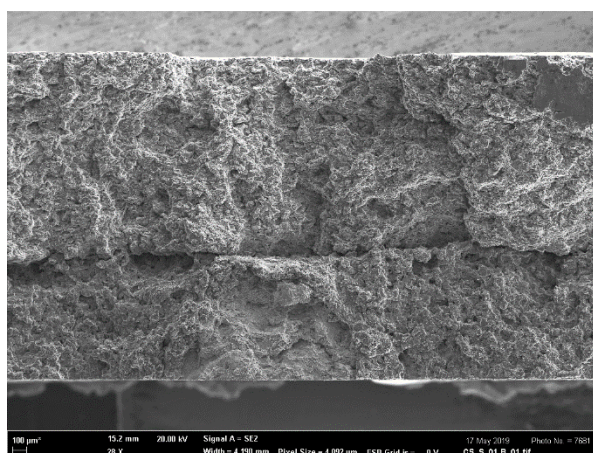
Obr. 120 Chemická analýza nečistot



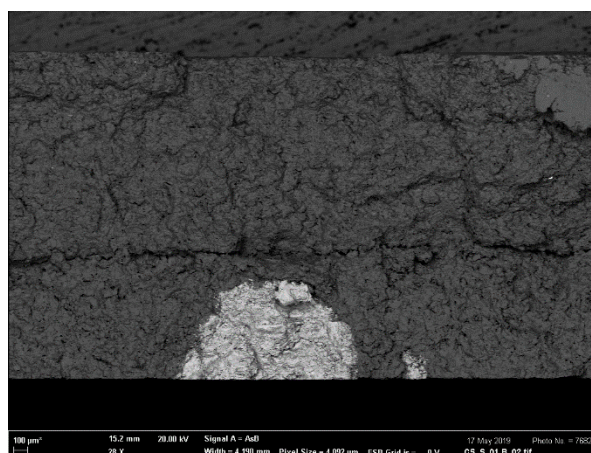
Obr. 121 Nečistoty v lomové ploše



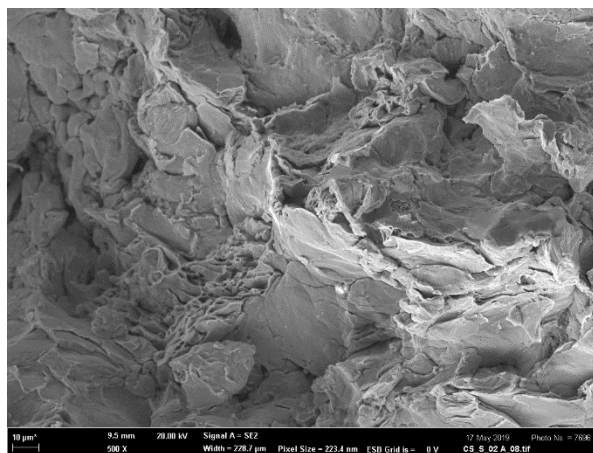
Obr. 122 Chemická analýza nečistot



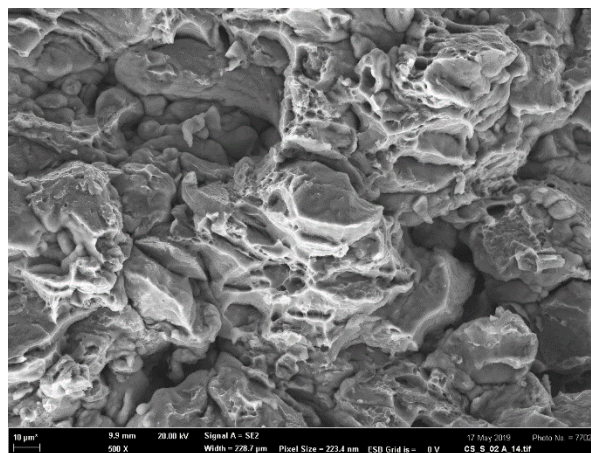
Obr. 123 Reliéf lomové plochy



Obr. 124 Rozlišení materiálů v lomové ploše



Obr. 125 Lomová plocha železa



Obr. 126 Lomová plocha hliníku

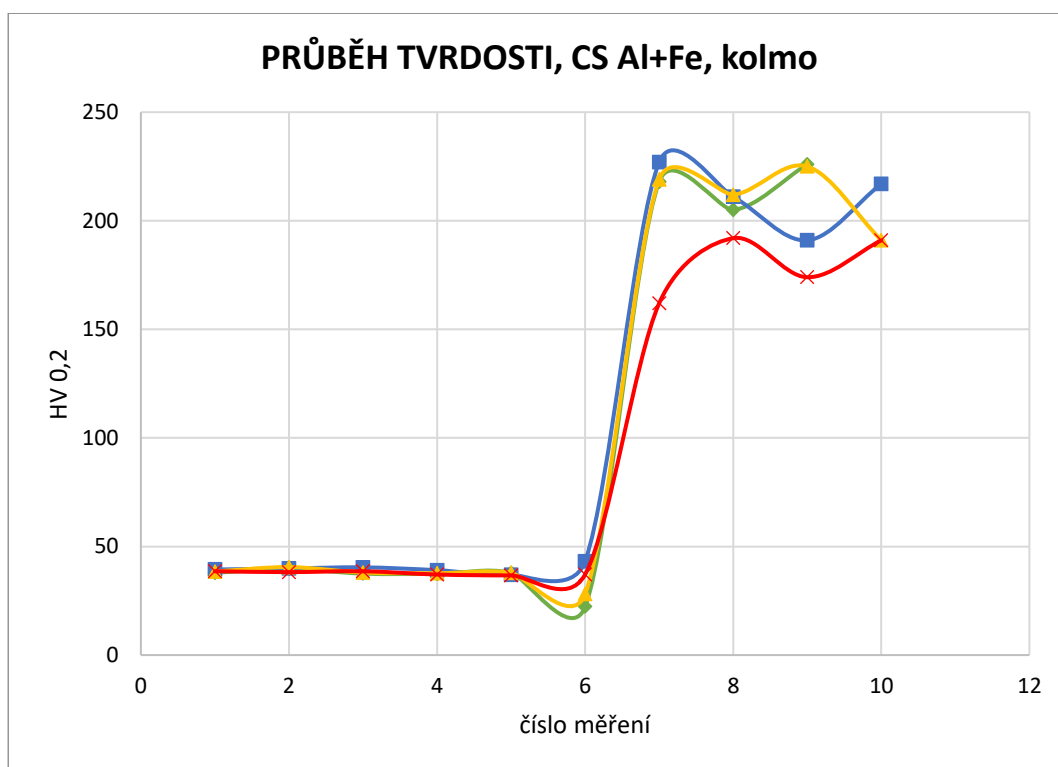
Pro porovnání vlastností architektonického materiálu typu CS hliník + CS železo byly vytvořeny vzorky samotného CS hliníku, na kterých byly provedeny tahové zkoušky. Výsledky z tahových zkoušek jsou uvedeny v tabulce Tab. 8.

Vzorek	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A %	E [GPa]
1	81,30	63,9	7,794	37,5
2	80,68	64,7	7,505	35,5
3	80,63	61,9	8,561	48,9
4	80,62	61,2	7,168	47,1

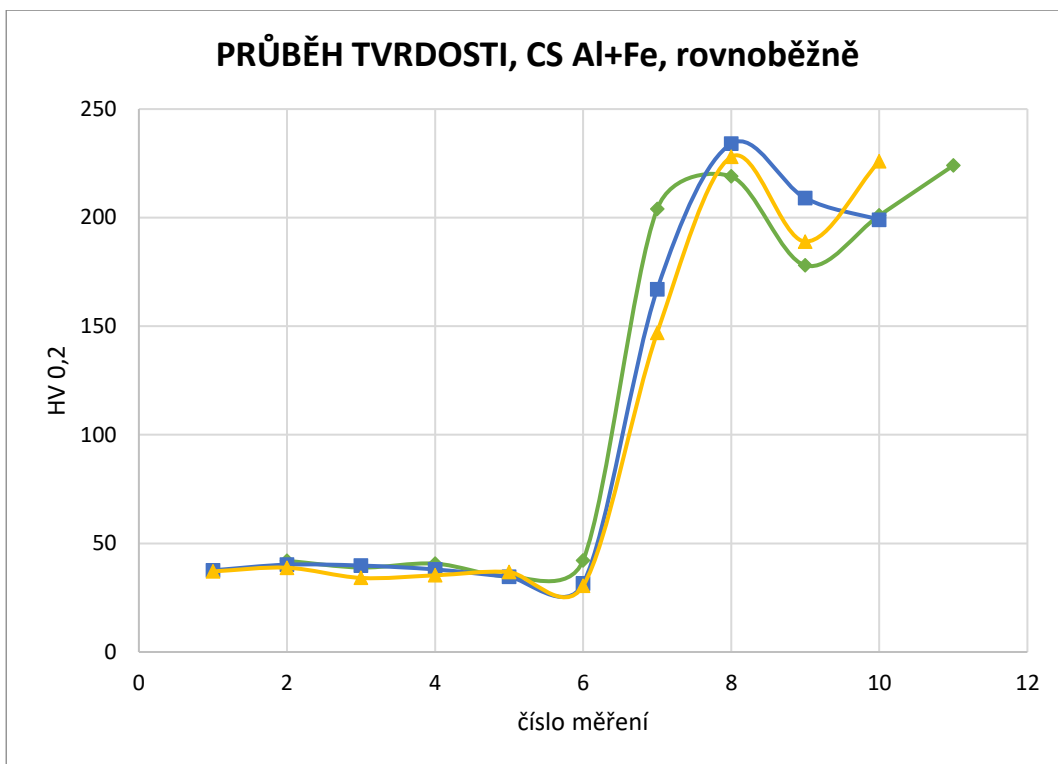
Tab. 8 Hodnoty z tahových zkoušek vzorků pro CS hliník

3.4.3 Měření tvrdosti

U tohoto experimentu, kde zkoumaný vzorek se skládá z CS stříkaného hliníku a CS stříkaného železa, je podstatná jak tvrdost železa, tak i hliníku a zda se tyto hodnoty liší v závislosti na směr stříkání cold sprejem. Záznamy průběhu tvrdostí jsou na grafech Graf 17 a Graf 18.



Graf 17 Průběh tvrdosti, CS hliník a CS železo, kolmo



Graf 18 Průběh tvrdosti, CS hliník a CS železo, rovnoběžně

Tvrdost HV 0,2 pro železo		
Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo
CS Al+Fe	201,92	199,06

Tab. 9 Průměrná tvrdost HV0,2 pro CS železo

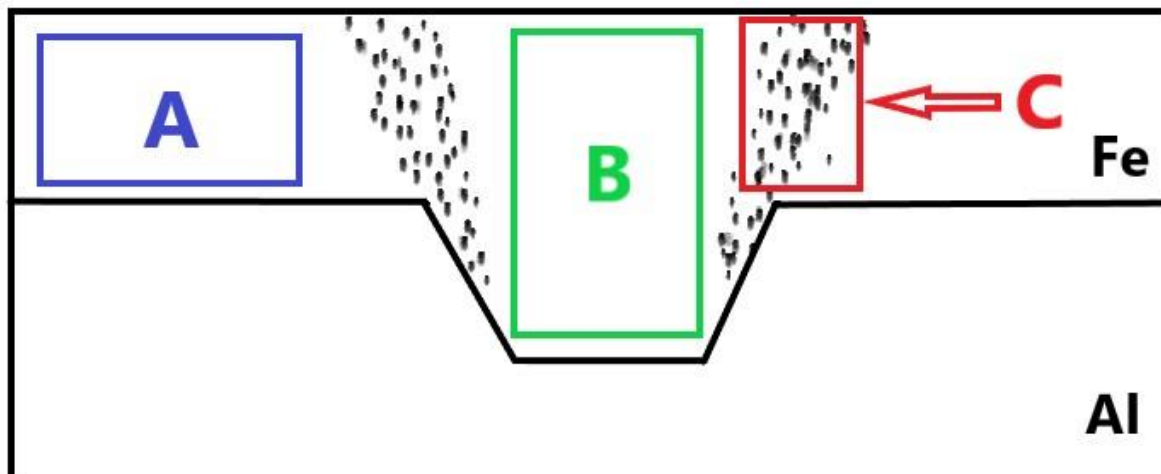
Tvrdost HV 0,2 pro hliník		
Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo
CS Al+Fe	37,24	37,45

Tab. 10 Průměrná tvrdost HV0,2 pro CS hliník

Z grafů (viz Graf 17 a Graf 18) lze vidět průběh tvrdosti. Hliník má podstatně stálější tvrdost bez větších výkyvů, kdežto u železa tvrdost kolísá. Z průměrných hodnot tvrdosti v tabulce Tab. 9 lze vyvodit závěr, že tvrdost hliníku ve směru rovnoběžném na směr stříkání je stejná jako v kolmém směru (rozdíl pouze 0,2 HV 0,2). Tvrdost železa je rozdílná v závislosti na směr stříkání a hodnoty měření ve vrstvě železa nebyly konstantní. Z průměrných hodnot v tabulce Tab. 10 vyplývá, že tvrdost železa ve směru rovnoběžném se směrem nanášení CS je vyšší než v kolmém směru (rozdíl činí zhruba 3 HV 0,2). Průběh tvrdosti ve vrstvě není lineární, což může být způsobeno jak pórovitostí železa, tak zjištěných nečistot a vměstků ve vrstvě železa.

3.5 Porozita vzorků

Porozita vzorků byla měřena na třech místech (viz Obr. 127). Z každého místa byly tři měření a jejich průměrná hodnota je uvedena v tabulce Tab. 11. Plocha A je místo, které je mimo drážku a není ovlivněno pásy pórů. Plocha B slouží k určení porozity uvnitř drážky a ke zjištění vlivu drážky na porozitu. Poslední plocha C slouží k porovnání porozity nástřiku, vlivu drážky a vzniku pásů pórů.



Obr. 127 Místa měření porozity nástřiku železa: mimo drážku (A), v drážce (B), pásy pórů (C)

V tabulce Tab. 11 je uvedena porozita vzorků. Místa označená x značí, že na vzorku nemohla být daná porozita změřena (na výbrusu se nevyskytovala drážka). Porozita byla vyhodnocována ze snímku ze světelného mikroskopu. Z důvodu malé tloušťky nástřiků pouze u vzorků CS Al + CS Fe byla hodnocena na snímcích z elektronového mikroskopu.

Označení v tabulce je následující: drážka u značí drážku čtvercového profilu, drážka v značí drážku lichoběžníkového profilu, písmeno C znamená čtvercovou geometrii, S je sinusová geometrie a T je trojúhelníková geometrie a jako poslední je uveden směr k nástřiku, ve kterém byla tvrdost měřena. Třetí experiment je označen oba CS a za pomlčkou je materiál, který se zkoumal.

Vzorek	Rovnoběžně se směrem nástřiku				Kolmo ke směru nástřiku		
	A	B	C		A	B	C
Drážka u, C	0,79	1,97	9,97		0,46	1,51	9,57
Drážka u, S	0,46	0,70	13,16		0,44	0,69	10,30
Drážka u, T	0,68	1,13	8,67		0,62	0,99	10,77
Drážka v, C	1,05	1,23	7,24		4,66	2,26	9,01
Drážka v, S	1,29	2,52	7,27		1,27	x	x
Drážka v, T	0,92	1,71	6,54		0,64	1,87	7,22
Oba CS – Al	1,31	1,00	3,11		0,94	1,40	0,91
Oba CS – Fe	1,42	2,15	2,38		1,48	0,94	0,64

Tab. 11 Hodnoty porozity všech vzorků na 3 místech A-C

U vzorků s U-drážkou a V-drážkou lze pozorovat, že porozita je zvýšená v místech uvnitř drážky. Platí to pro směr rovnoběžný se směrem nástřiku tak i kolmo ke směru nástřiku. Porozita nástřiku mimo drážky se pohybuje v rozmezí 0,5-1 %, stejně jak uvádí literatura [6]. Porozita pásů pórů je mnohonásobně vyšší než v ostatních měřených místech. Z tabulky také plyne, že u vzorků s V-drážkou je porozita vyšší a póry se vyskytují v celém objemu. Pásky jsou méně porézní než u typu U-drážky. Porozita u vzorků s U-drážkou je nižší a póry jsou menší, ale zase jsou mnohem koncentrovanější a větší v pásích pórů vedoucích od hran drážek k povrchu.

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

K účelům této diplomové práce byly postupně vytvořeny tři sady experimentů, u kterých se způsob výroby vzorků vyvíjel z poznatků předchozího experimentu a geometrie drážek [36]. Po zkoumání všech tří experimentů lze porovnat jejich mechanické vlastnosti a najít nejlepší řešení. Podnětem této závěrečné práce byl článek uvádějící, že architektonický materiál vytvořený z „obyčejných“ kovů může dosáhnout vlastností ušlechtilého materiálu. Idea z tohoto článku spočívá ve vyztužení kovu o malé pevnosti, nízkém modulu pružnosti ale vysoké tuhosti kovem s vyšší tuhostí [6]. Především se zkoumání zaměřilo na druhý a třetí experiment z důvodů použití stejných materiálů – čistého hliníku a čistého železa.

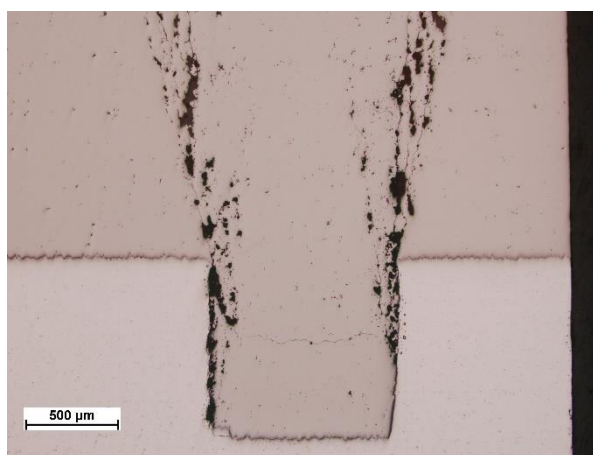
Bylo zjištěno, že geometrie drážek nemá velký vliv na strukturu. Oproti tomu zásadní vliv na strukturu má profil drážek, přičemž bylo zjištěno, že čtvercový profil je nevhodný pro architektonický materiál v kombinaci s technologií cold spray. Částice železa obtížně dopadaly na svislé stěny drážky, a tak nevzniklo kvalitní rozhraní, a navíc se zvýšila porozita. O poznání lepší rozhraní bylo pozorováno u profilu lichoběžníkového, kdy se kvalitní rozhraní tvořilo na všech stěnách drážky. Bohužel se nezmenšila porozita vzorku. Póry byly menší v celém objemu nástřiku oproti předcházejícímu experimentu. Z hlediska kvality rozhraní byl nejlepší vzorek, u kterého se jak hliník, tak i železo nanášely technologií cold spray. U prvních dvou experimentů byly viditelné pásy pórů, které souvisí s geometrií nástřiku [34].

Odborná literatura uvádí, že se technologie cold spray vyznačuje nízkou porozitou nástřiku [6, 16]. Tento fakt se potvrdil pouze na místech mimo drážku, do kterých nezasahoval pás pórů. Tabulka Tab. 12 uvádí hodnoty porozit na třech místech u všech vzorků. Lze si všimnout, že na porozitu nemá významný vliv směr nástřiku.

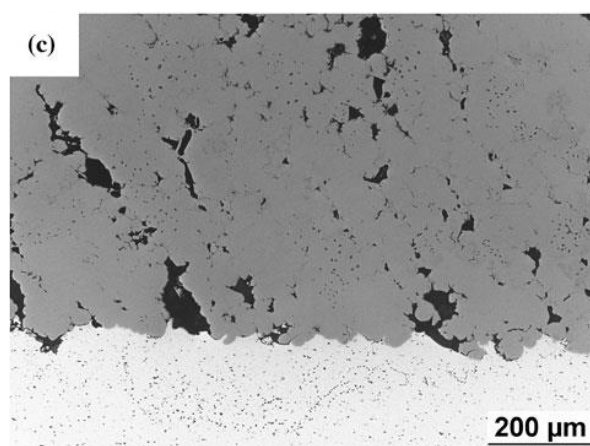
Vzorek	Rovnoběžně se směrem nástřiku			Kolmo ke směru nástřiku		
	A [%]	B [%]	C [%]	A [%]	B [%]	C [%]
Drážka u, C	0,79	1,97	9,97	0,46	1,51	9,57
Drážka u, S	0,46	0,70	13,16	0,44	0,69	10,30
Drážka u, T	0,68	1,13	8,67	0,62	0,99	10,77
Drážka v, C	1,05	1,23	7,24	4,66	2,26	9,01
Drážka v, S	1,29	2,52	7,27	1,27	x	x
Drážka v, T	0,92	1,71	6,54	0,64	1,87	7,22
Oba CS – Al	1,31	1,00	3,11	0,94	1,40	0,91
Oba CS – Fe	1,42	2,15	2,38	1,48	0,94	0,64

Tab. 12 Hodnoty porozity všech vzorků

Na snímcích mikrostruktur se vyskytovaly pásy pórů, které vedly od hrany drážky k povrchu. Tento jev zřejmě souvisí s úhlem dopadu částic na substrát. Literatura, která se zabývala vlivem úhlu dopadu částic na substrát, udává, že s menším úhlem dopadu než 90° vzniká sloupovitá mikrostruktura a porozita nástřiku je vyšší než 6 %. Tento jev také zhoršuje mechanické vlastnosti (v některých případech i na polovinu původních hodnot) a také usnadňuje vznik trhlin a jejich šíření [33]. Poznatky z této literatury se shodují s pásy pórů v případě prvního a druhého experimentu v této práci, tj. vyšší porozita, vznik trhlin a špatná kvalita rozhraní. Ke stejným závěrům vede porovnání obrázků (viz Obr. 128 a Obr. 129), kde vlevo je obrázek mikrostruktury z prvního experimentu a vpravo je obrázek z literatury, kdy částice dopadaly pod úhlem 45° .

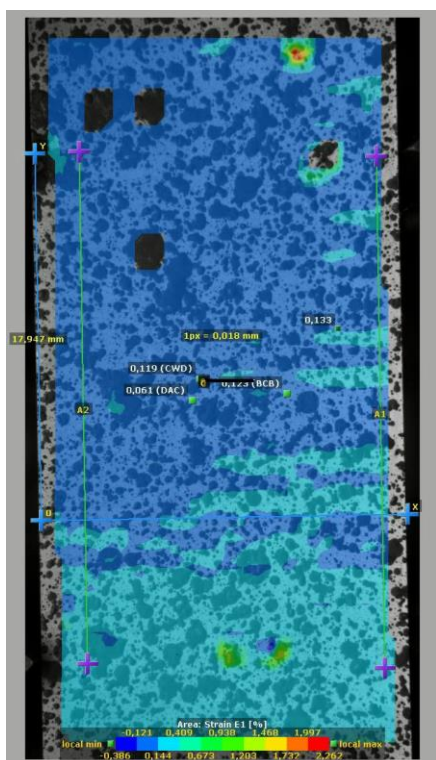


Obr. 128 Nástřik částic CS z experimentu této práce

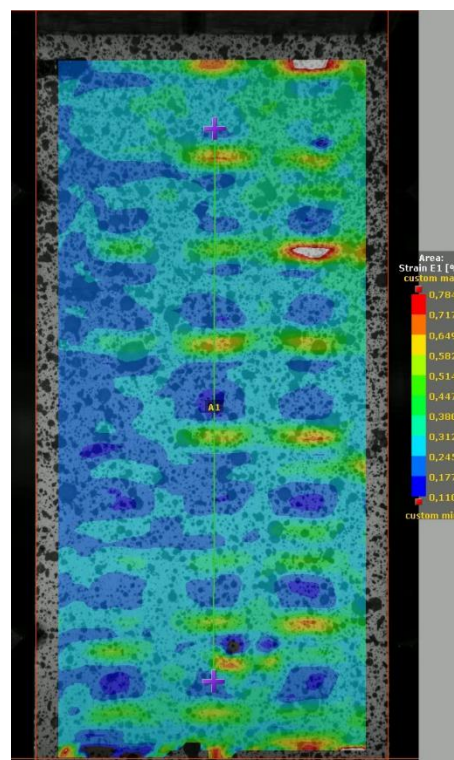


Obr. 129 Nástřik částic CS pod úhlem 45° [33]

Dalším faktorem určujícím kvalitu architektonického materiálu byla tahová zkouška, která ukázala zapojení výztuže při namáhání. Na snímcích z tahových zkoušek při použití aplikace digitální korelace obrazu lze pozorovat drážky, které přenášely napětí. Na obrázku Obr. 130, který pochází z druhého experimentu, lze vidět pouze drážky kolmé ke směru namáhání ale drážky rovnoběžné se směrem namáhání se do procesu zpevnění materiálu nezapojují. Je to zřejmě způsobeno porozitou v okolí drážek a vzniklými trhlinami, které nejsou schopny přenášet napětí. Oproti tomu na obrázku Obr. 131 pocházejícího z třetího experimentu lze vidět čtvercovou geometrii drážek, což značí, že k přenosu napětí byly využity oba směry drážek. Z toho vyplývá, že přenos energie lépe zabezpečovaly drážky z třetího experimentu.

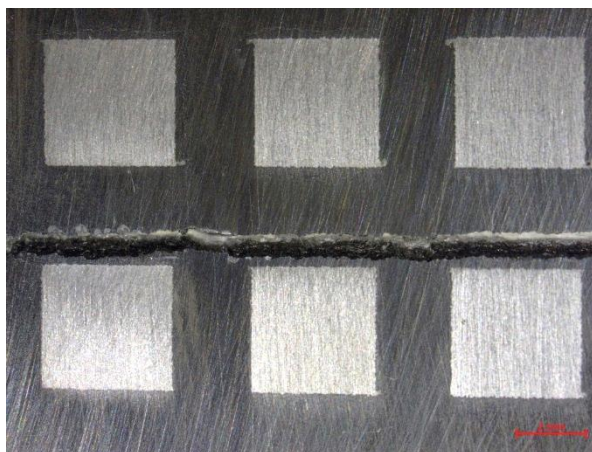


Obr. 130 Napětí ve vzorku C z 2. experimentu



Obr. 131 Napětí ve vzorku C z 3. experimentu

Po analýze záznamu z tahových zkoušek se přesunul zájem zkoumání k místům lomů. V odborné literatuře je uvedeno, že technologie cold spray mírně snižuje mechanické vlastnosti [6, 16]. Ve všech případech tahových zkoušek byl vzorek porušen v blízkosti drážek. Byl však zásadní rozdíl mezi místem lomu v druhém a třetím experimentu, jak dokazují obrázky Obr. 132 a Obr. 133. Je patrné, že v případě druhého experimentu došlo k porušení v drážce železa. Zřejmě je to způsobeno kvalitou rozhraní hliníku s železem a také pásy pórů. Na snímcích struktur byly patrné mikrotrhliny, které spojovaly nahromaděné póry. Tím se oslabil materiál a došlo k předčasnému lomu. Odlišný případ je na lomu z třetího experimentu, kdy lom běžel podél drážky v hliníkovém substrátu. To značí kvalitu rozhraní hliníku s železem a také to, že nedocházelo k hromadění pórů. Lze také vidět, že drážky ve směru namáhání byly částečně vytrženy a lom se nešířil v jedné přímce.

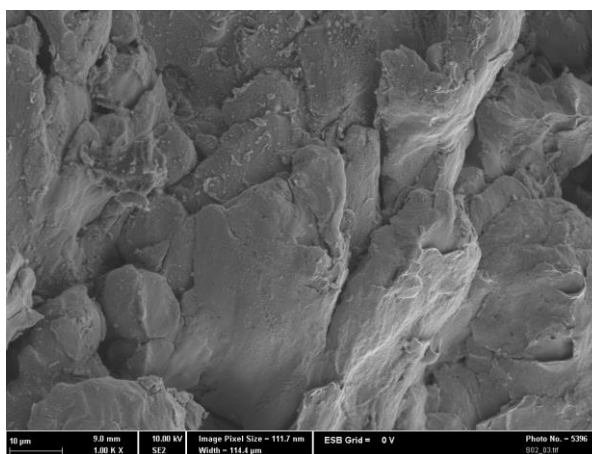


Obr. 132 Lom druhého experimentu

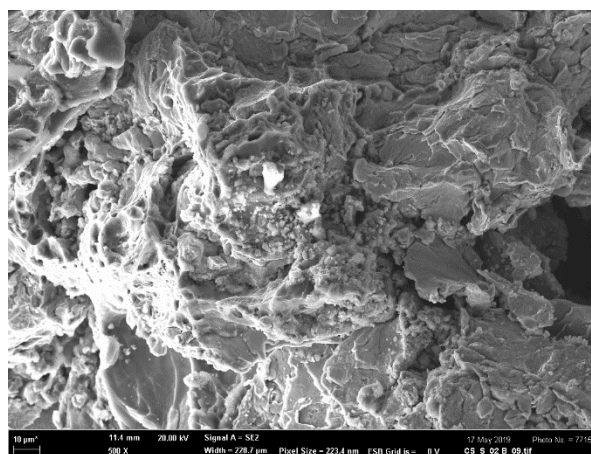


Obr. 133 Lom třetího experimentu

Po zkoumání lomu z makroskopického měřítka se přešlo ke zkoumání lomové plochy v elektronovém mikroskopu. Podstatné bylo zjištění principu lomu a zda existovaly negativní vlivy ovlivňující výsledky. V případě druhého experimentu byly na ploše lomu železa nalezeny oxidy viditelné na obrázku Obr. 134. Porušení vzorku je křehké a nalezené oxidy mohly snížit mechanické vlastnosti vzorku. Vznik oxidů patrně souvisí s porozitou vzorku. V nástřiku došlo k propojení jednotlivých pórů mikrotrhlinami, ve kterých mohly oxidy vznikat. V třetím experimentu při zkoumání mikrostruktury nástřiku železa byly na obrázku Obr. 135 nalezeny viditelné nečistoty a částice obsahující vysoký podíl manganu. Z tohoto důvodu byla provedena analýza železného prášku. Bylo zjištěno mírného znečištění prášku, což potvrdilo nečistoty ze snímků mikrostruktury. Ve vzorku se vyskytovaly částice vápníku, křemíku a mangan byl navázán na železo. I přes znečištění prášku železa se v lomové ploše železa vyskytovala místa, která vykazovala tvárné porušení.



Obr. 134 Oxidy na lomové ploše 2.experimentu



Obr. 135 Nečistoty v železe 3.experimentu

Dalším bodem výzkumu bylo měření tvrdosti. Technologie cold spray je založena na plastické deformaci částic bez jejich natavení, čímž se vytvoří nástřík v širokém rozmezí tloušťek. Plastická deformace mohla mít vliv na tvrdost. Měření tvrdosti substrátu bylo pouze orientační. Došlo ke zjištění, že hliníková slitina použitá v prvním experimentu je tvrdší cca o 20 HV 0,2 než substrát z čistého hliníku. Významným poznatkem bylo, že hliníková vrstva vytvořená technologií cold spray je tvrdší než tvářený čistý hliník. Navíc není rozdíl mezi tvrdostí ve směru rovnoběžném se směrem nástříku a ve směru kolmém na směr stříkání. U železa stříkaného technologií cold spray závisí tvrdost na směru nástříku, ale rozdíl není markantní a maximální odchylky byly do hodnoty 10 HV 0,2 (viz Tab. 13).

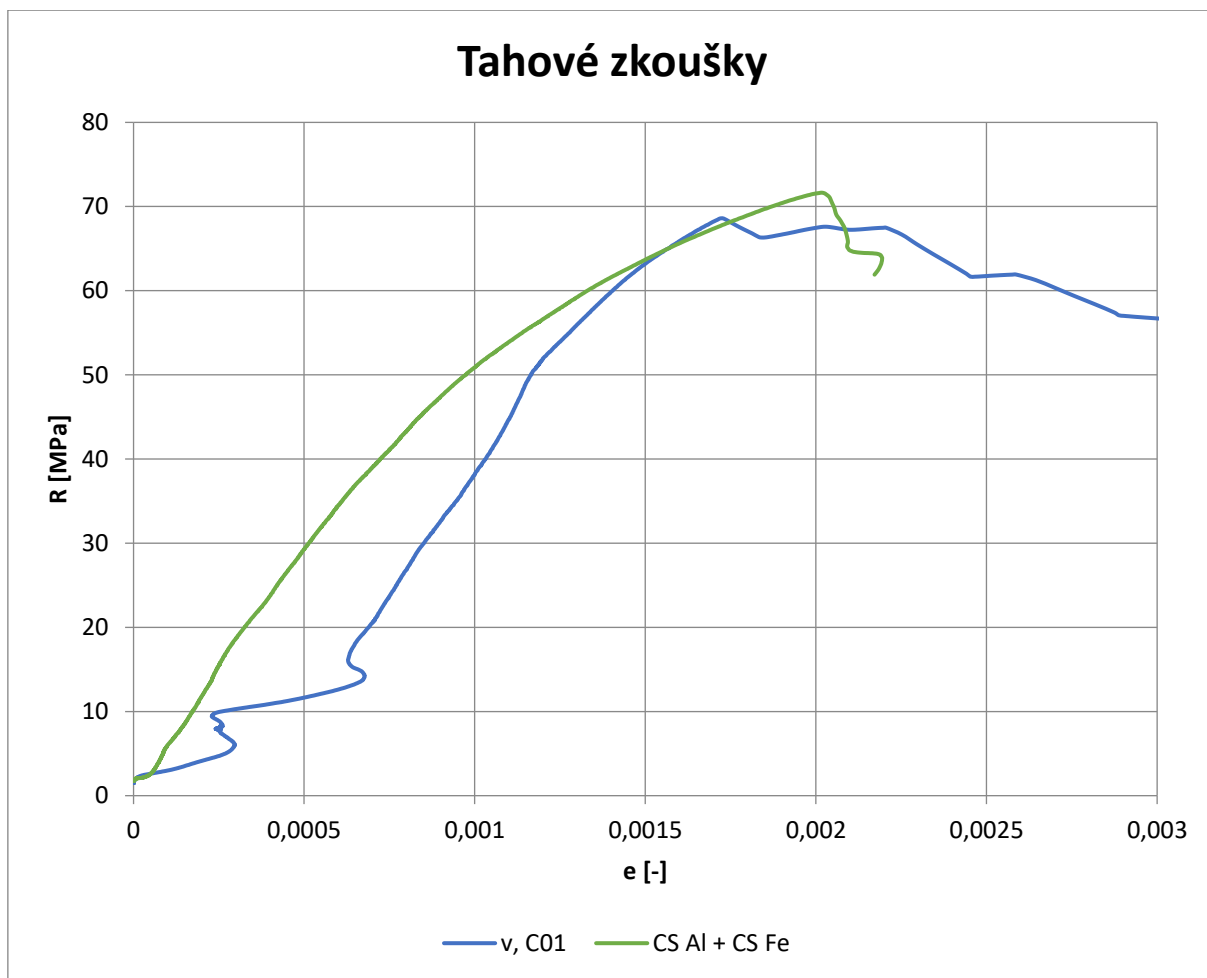
Tvrdost HV 0,2 pro železo				Tvrdost HV 0,2 pro hliník		
Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo		Vzorek	Rovnoběžně	Kolmo
drážka u, T	241,04	240,42		drážka u, T	58,60	58,58
drážka u, C	240,72	239,25		drážka u, C	59,56	58,51
drážka u, S	238,28	237,29		drážka u, S	58,76	58,34
drážka v, T	203,11	200,46		drážka v, T	33,74	34,71
drážka v, C	206,95	203,57		drážka v, C	38,32	36,76
drážka v, S	205,94	198,90		drážka v, S	36,28	35,61
CS Al+Fe	201,92	199,06		CS Al+Fe	37,24	37,45

Tab. 13 Tabulka tvrdostí pro hliník a železo

K porovnání mechanických vlastností materiálů vytvořených technologií cold spray s konvenčními materiály byly vytvořeny vzorky pro tahové zkoušky z vybraných materiálů, mezi které patřil i hliník (viz Tab. 14). Výsledky z těchto zkoušek posloužily k porovnání vlastností architektonického materiálu a ověření, zda došlo ke zlepšení vlastností hliníku díky výztuži ze železa. Z vybraných výsledků tahových zkoušek se vytvořil graf Graf 19 k porovnání mechanických vlastností mezi jednotlivými geometriemi. Z druhého experimentu byli vybráni zástupci všech geometrií. V třetím experimentu existuje pouze čtvercová geometrie.

Vzorek	Rm	Rp0,2	A	E
	[MPa]	[MPa]	%	[GPa]
1	81,30	63,9	7,794	37,5
2	80,68	64,7	7,505	35,5
3	80,63	61,9	8,561	48,9
4	80,62	61,2	7,168	47,1

Tab. 14 Tabulka mechanických vlastností CS hliníku



Graf 19 Výsledky tahových zkoušek různých geometrií

V grafu lze vidět, že meze pevnosti druhého a třetího experimentu se pohybovaly okolo hodnot 70 MPa. Z grafu vyplývá, že vzorek CS hliník a CS železo má vyšší mez pevnosti než tvářený hliník a CS železo.

Z tahových zkoušek nebylo vždy možné určit přesně modul pružnosti. Některé tahové křivky nebyly dostatečně hladké s rovným úsekem pro vyhodnocení modulu pružnosti. Nevhodný tvar tahové křivky je vidět u druhého experimentu, kdy na začátku zkoušky jsou poskoky. Tyto poskoky v průběhu postupného zatěžování způsobilo postupné propojování mikrotrhlin v porézních místech v okolí svislých stěn drážek. Vzorky připravené na tahové zkoušky byly mírně prohnuté, což mohlo mít vliv na průběh zkoušky a vznik poskoků. Celkové chování u tohoto vzorku je dáno spíše mikrotrhlinami spojující póry. Navíc drážky fungují jako koncentrátoři napětí, což snižuje mechanické vlastnosti. Na rozdíl od druhého experimentu je tahová křivka u třetího experimentu hladší. Rozhraní CS hliník a CS železo je pevnější, takže se vzorek chová více jako homogenní materiál. To šlo také rozpoznat na snímcích ze záznamů tahových zkoušek, kdy se zapojily drážky kolmé i rovnoběžné ke směru namáhání. Lze srovnat meze pevností u tvářeného hliníku a CS hliníku. U tvářeného hliníku se mez pevnosti pohybuje v rozmezí 105 až 145 MPa (viz Tab. 15). Architektonický materiál dosáhl mez pevnosti pod 70 MPa, což je výrazný pokles pevnosti. V případě CS hliníku byla pevnost stanovena na 81 MPa (viz Tab. 15) a architektonický materiál s tímto hliníkem měl pevnost nad 70 MPa,

takže pokles pevnosti v třetím experimentu je mnohem menší než v druhém experimentu. Podle výsledků meze pevnosti lze říct, že spojení CS hliník a CS železo je ideálnější než použití tvářeného hliníku.

Materiál		R_m [MPa]	R_{p0,2} [MPa]
EN AW5754-H22 (AlMg3)	Slitina hliníku	220-270	130
EN AW-1050A H24	Hliník 99,5	105-145	85
CS hliník	Hliník 99,5	81	63

Tab. 15 Tabulka mechanických vlastností hliníkových substrátů [41, 42]

Největším problémem u vzorků byla jejich porozita, která snižovala mechanické vlastnosti. Porozita u některých vzorků narušila kvalitu rozhraní hliníku a železa a způsobila předčasný lom. Její zvýšená hodnota byla také způsobena nevhodným profilem drážky, který napomáhal vzniku mikrotrhlin. Důvodem zvýšené porozity mohly být i nevhodné parametry nástřiku.

Řešením, jak minimalizovat porozitu navrhnutých architektonických materiálů, je zkusit jiné parametry nástřiku, případně použít jiný nosný plyn. Architektonický materiál by měl být vytvořen z CS hliníku a CS železa. Tento postup výroby zaručí ideální profil drážky, díky kterému byla kvalita rozhraní vysoká. Tepelné zpracování je dalším řešením, jak zlepšit vlastnosti architektonického materiálu. Může snížit porozitu, ale také může snížit pevnost.

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá architektonickými materiály v kombinaci s novou technologií cold spray. Snahou bylo vytvoření materiálu o lepších vlastnostech pomocí architektury materiálů a kombinací méně tuhého materiálu vyztuženého tužším materiálem. Vlastnosti nově vzniklého materiálu měly být podobné vlastnostem titanu.

Vytvořilo se několik variant vzorků, které se lišily geometrií drážek a jejich profilem. Prvotní myšlenkou byl čtvercový profil, následně se vytvořil lichoběžníkový profil a jako poslední se zkusily oba materiály stříkat technologií cold spray. Závěry práce vyplývající z experimentů jsou popsány níže.

Čtvercový profil drážek není vhodný k aplikaci technologie cold spray, protože nanášené částice mají problém se uchytit na svislých stěnách drážek.

V nástřiku železa technologií cold spray vznikaly pásy pórů. Porozita v těchto místech byla vysoká. Póry také usnadnily vznik mikrotrhlin spojující jednotlivé póry a tím snížily mechanické vlastnosti a usnadnil se vznik oxidů v materiálu.

Lichoběžníkový profil drážek byl vhodnější variantou, protože zde nebyly žádné svislé drážky, které by zabráňovaly vzniku kvalitního rozhraní. Vznik pásů pórů byl menší než u čtvercového profilu drážek, ale menší póry byly rozptýleny v celém objemu nástřiku železa.

Kvalita rozhraní hliníku s železem byla nejlepší v případě třetího experimentu, kdy byly oba materiály stříkány cold sprayem. Vzorky nebyly porušeny ve vrstvě železa ale v hliníku. Také ze záznamů tahových zkoušek bylo zřejmé zapojení jak drážek kolmých ke směru namáhání, tak i drážek rovnoběžných se směrem namáhání. Tento fakt byl velmi obtížně rozpoznatelný i v případě druhého experimentu.

Porušení vzorků bylo ve všech případech křehké, pouze na některých malých místech v třetím experimentu došlo k tvárnému lomu.

Podle všech uskutečněných zkoušek, zhodnocení mikrostruktury a po srovnání všech tří experimentů vyplynulo, že nejlepší pro tvorbu architektonického materiálu je varianta CS hliník a CS železo.

Výsledkem této diplomové práce je zjištění, že došlo ke zlepšení mikrostruktury změnou substrátu a profilem drážky. Nejlepších výsledků se dosáhlo, pokud hliník i železo byly stříkány technologií cold spray. Vzniklo pevnější rozhraní neporušené póry. Tato metoda byla nejefektivnější a má potenciál k dalšímu vývoji a jeho zkoumání tak, aby bylo dosaženo předpokládaných vlastností tohoto materiálu. Změnou nastavení parametru cold spraye je možné změnit vlastnosti a porozitu nástřiku. K dosažení lepších výsledků může dojít i změnou vyztužujícího materiálu (např. směs železa a oxidů nebo keramiky).

Výroba architektonických materiálů má budoucnost, protože tyto nové materiály mají žádané vlastnosti, které stávající materiály nejsou schopny poskytnout. Vývoj architektonických materiálů je teprve v počátku, hledají se optimální geometrie a kombinace materiálů a budoucnost ukáže, zda je to správná cesta.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MÍŠEK, Bohumil. *Polymery, keramika, kompozity*. Brno: Vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-214-0521-X.
- [2] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [3] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, N.P., 1988.
- [4] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [5] *Sandvik: Kovové prášky pro cold spray* [online]. Švédsko [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.materials.sandvik.cz/produkty/metal-powder/cold-spray/>
- [6] *Impact innovations: Cold spray* [online]. Německo [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.impact-innovations.com/en/coldgas/process_en.html
- [7] *Mallard: Cold spray* [online]. Francie [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.mallard-sa.fr/cold-gas-dynamic-spray>
- [8] *VRC Metal Systems: Cold spray* [online]. USA [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://vrcmetalsystems.com/technology-cold-spray/>
- [9] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [10] *CSAT: Cold spray action team* [online]. 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: www.coldsprayteam.com/aboutcoldspray.html
- [11] *U.S. Army Research Laboratory: Cold spray process* [online]. USA, 2010 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.arl.army.mil/www/default.cfm?page=370>
- [12] SINGH, Harminder, T.S. SIDHU a S.B.S. KALSI. Cold spray technology: future of coating deposition processes. *Frattura ed Integrità Strutturale* [online]. 2012, **6**(22), 69-84 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.22.08. ISSN 19718993. Dostupné z: <https://www.fracturae.com/index.php/fis/article/view/148>
- [13] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [14] RAOELISON, R.N., Y. XIE, T. SAPANATHAN, M.P. PLANCHE, R. KROMER, S. COSTIL a C. LANGLADE. Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **19**, 134-159 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1016/j.addma.2017.07.001. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221486041630207X>
- [15] MUSIL, Lukáš. Machovo číslo v letectví. In: *Czech airliners* [online]. 2016 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.czechairliners.net/index.php/archiv-clanku-1/1011-rychlost-letadel-podle-machova-cisla.html>

- [16] MORIDI, A., S. M. HASSANI-GANGARAJ, M. GUAGLIANO a M. DAO. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives. *Surface Engineering* [online]. 2013, **30**(6), 369-395 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1179/1743294414Y.00000000270. ISSN 0267-0844. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743294414Y.00000000270>
- [17] KHUN, N. W., A. W. Y. TAN, W. SUN a E. LIU. Effect of Heat Treatment Temperature on Microstructure and Mechanical and Tribological Properties of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Coatings. *Tribology Transactions* [online]. 2017, **60**(6), 1033-1042 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1080/10402004.2016.1244584. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10402004.2016.1244584>
- [18] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-23]. ISBN 978-80-248-3378-1.
- [19] BARTHELAT, F. Architected materials in engineering and biology: fabrication, structure, mechanics and performance. *International Materials Reviews* [online]. 2016, **60**(8), 413-430 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1179/1743280415Y.00000000008. ISSN 0950-6608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743280415Y.00000000008>
- [20] *Architected multifunctional materials: symposium held April 14-16, San Francisco, California, U.S.A.* Warrendale: Materials Research Society, 2012. Materials Research Society symposium proceedings. ISBN 978-1-107-40817-3.
- [21] DLOUHÝ, I., L. ŘEHOŘEK, J. ČÍŽEK a F. ŠÍŠKA. *Architected multi-metallic structures prepared by cold gas dynamic spray deposition* [online]. 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://konference.fmfi.vsb.cz/work2018/abstracts/Dlouhy.pdf>
- [22] ASHBY, M.F. a Y.J.M. BRÉCHET. Designing hybrid materials. *Acta Materialia* [online]. 2003, **51**(19), 5801-5821 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00441-5. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645403004415>
- [23] *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů: Pultruze* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- [24] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [25] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 1. část* [online]. Brno, 2003 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [26] *SOLIDWORKS Tech Blog: Introduction to Composites* [online]. 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://blogs.solidworks.com/tech/2018/08/introduction-to-composites.html>
- [27] *Metalco Testing s.r.o: Tvrdoměr* [online]. Roztoky u Prahy, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/tvrdomery/tvrdomer-q10-q30-q60--varianta-a/>
- [28] *Zwick Roell: Static Materials Testing Machines* [online]. Německo, 2018 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/en/static-materials-testing-machine>

- [29] YIN, Shuo, Pasquale CAVALIERE, Barry ALDWELL, Richard JENKINS, Hanlin LIAO, Wenya LI a Rocco LUPOI. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**, 628-650 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.017. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860417302993>
- [30] *MARSC Technologies: Cold spray* [online]. USA [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.marsctechnologies.com/hpcs-vs-lpcs>
- [31] SCHMIDT, Tobias, Hamid ASSADI, Frank GÄRTNER, Horst RICHTER, Thorsten STOLTENHOFF, Heinrich KREYE a Thomas KLASSEN. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2009, **18**(5-6), 794-808 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-009-9357-7>
- [32] FAUCHAIS, Pierre L. *Thermal spray fundamentals: from powder to part* [online]. New York, NY: Springer Science Business Media, 2013 [cit. 2019-05-23]. ISBN 978-0-387-28319-7.
- [33] BINDER, K., J. GOTTSCHALK, M. KOLLEND, F. GÄRTNER a T. KLASSEN. Influence of Impact Angle and Gas Temperature on Mechanical Properties of Titanium Cold Spray Deposits. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2011, **20**(1-2), 234-242 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1007/s11666-010-9557-1. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-010-9557-1>
- [34] DLOUHÝ, Ivo. *Architected multi-metallic structures prepared by cold gas dynamic spray deposition* [prezentace]. Ostrava: New methods of damage and failure analysis of structural parts, 2018 [cit. 2019-05-23].
- [35] NOVOTNÁ, Hana. *Struktura a vlastnosti slinutých karbidů* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/100857>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Čelko, Ph.D.
- [36] ŘEHOŘEK, L., I. DLOUHÝ a V. JAN. *Cold gas dynamic spray deposition as additive manufacturing of architected materials* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-05-23]. ISSN 1338 - 6174. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328191812_COLD_GAS_DYNAMIC_SPRAY_DEPOSITION_AS_ADDITIVE_MANUFACTURING_OF_ARCHITECTURED_MATERIALS
- [37] *Sobriety s.r.o.: Monet* [online]. 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.sobriety.cz/cs/opticke-merici-systemy-monet>
- [38] *GTV SPRAY POWDER CATALOGUE* [online]. GTV Verschleißschutz, 2014 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://www.gtv-mbh.com/cms/upload/downloads/en/GTV_Spray_Powder_Catalogue_2014.pdf
- [39] *Alfa Aesar: Iron powder* [online]. 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.alfa.com/en/catalog/014183/>
- [40] In: *Alfa Aesar: Certificate of analysis - iron powder* [online]. 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.alfa.com/en/certs/certs1/14183-5007r07s.pdf>
- [41] *Alunet: Mechanické vlastnosti EN AW-1050* [online]. 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-1050>
- [42] *Alunet: Mechanické vlastnosti EN AW-5754* [online]. 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-5754>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Význam
CS		Cold spray
DIC		Digital image correlation
HPCS		High pressure cold spray
LPCS		Low pressure cold spray

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obr. 1 Typy kompozitů [24].....	14
Obr. 2 Typy uspořádání vláken [2].....	15
Obr. 3 Struktura slinutého karbidu [35].....	17
Obr. 4 Zjednodušené schéma pultruze [2].....	18
Obr. 5 Schéma pultruze [23].....	19
Obr. 6 Technologie navíjení [1]	19
Obr. 7 Výroba kompozitů lisováním [2]	20
Obr. 8 Schéma výroby kompozitů infiltrací [2]	20
Obr. 9 Technologie nástřiku kompozitů [2]	22
Obr. 10 Uložení vláken v kompozitu [26].....	22
Obr. 11 Typy obrábění [25].....	23
Obr. 12 Technologie tváření – kování a válcování [2].....	24
Obr. 13 Předpoklad vlastností architektonického materiálu [22].....	25
Obr. 14 Lavalova tryska- průřez [32].....	27
Obr. 15 Pistole 5/11 pro HPCS [6].....	29
Obr. 16 Průřez pistolí 5/11 [6].....	29
Obr. 17 Schéma vysokotlakého cold spray [28].....	30
Obr. 18 Schéma nízkotlakého cold spray [28]	31
Obr. 19 Atomizace vodou [18].....	33
Obr. 20 Atomizace vzduchem [18].....	33
Obr. 21 Depoziční okno (rychlost částic) [31]	34
Obr. 22 Předpokládané vlastnosti architektonických materiálů [34]	37
Obr. 23 Čtvercová síť	38
Obr. 24 Sinusová síť	38
Obr. 25 Trojúhelníková síť	38
Obr. 26 Tvrdoměr Q10A [27]	38
Obr. 27 Zwick Roell, Z250.....	39
Obr. 28 Vytvořené vzorky všech tří geometrií před řezáním	40
Obr. 29 Kolmo ke směru nástřiku, 50x zvětšen nástřik a drážka	40
Obr. 30 Kolmo ke směru nástřiku, 100x zvětšena drážka	40
Obr. 31 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 50x zvětšena drážka a nástřik	41
Obr. 32 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšen detail drážky	41
Obr. 33 Kolmo ke směru nástřiku, 50x zvětšena drážka	41
Obr. 34 Kolmo ke směru nástřiku, 100x zvětšen detail drážky.....	41
Obr. 35 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 50x zvětšena drážka.....	42
Obr. 36 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšena hrana drážky a nástřik.....	42

Obr. 37 Kolmo ke směru nástřiku, 50x zvětšen nástřik mezi drážkami a drážka	42
Obr. 38 Kolmo ke směru nástřiku, 100x zvětšen detail drážky.....	42
Obr. 39 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 50x zvětšen nástřik a drážka.....	43
Obr. 40 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšena hrana drážky.....	43
Obr. 41 Čtvercová geometrie	48
Obr. 42 Sinusová geometrie	48
Obr. 43 Trojúhelníková geometrie	48
Obr. 44 Vyznačené oblasti pro analýzu.....	49
Obr. 45 Výsledek EDS analýzy a rozložení prvků.....	49
Obr. 46 Výsledek chem. analýzy spektra 1	49
Obr. 47 Výsledek chem. analýzy spektra 2	49
Obr. 48 Rozložení hliníku na rozhraní	49
Obr. 49 Rozložení železa na rozhraní.....	49
Obr. 50 Výsledek chem. analýzy rozhraní	50
Obr. 51 Kolmo ke směru nástřiku, 50x zvětšen nástřik a drážka	50
Obr. 52 Kolmo ke směru nástřiku, 50x zvětšen nástřik, velmi porézní	50
Obr. 53 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 50x zvětšena drážka.....	51
Obr. 54 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšena hrana drážky s trhlinami	51
Obr. 55 Kolmo ke směru nástřiku, 50x zvětšen nástřik.....	51
Obr. 56 Kolmo ke směru nástřiku, 200x zvětšeno rozhraní	51
Obr. 57 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 50x zvětšena drážka.....	52
Obr. 58 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšen nástřik s trhlinami	52
Obr. 59 Kolmo ke směru nástřiku, 50x zvětšena drážka	52
Obr. 60 Kolmo ke směru nástřiku, 100x zvětšena hrana drážky.....	52
Obr. 61 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 50x zvětšena drážka.....	53
Obr. 62 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšena hrana drážky.....	53
Obr. 63 Koncentrace napětí v C02	55
Obr. 64 Napětí v C02 před lomem	55
Obr. 65 Místo lomu C01	55
Obr. 66 Místa vzniku trhlín v C01.....	55
Obr. 67 Lom C02.....	56
Obr. 68 Lom 2 C02.....	56
Obr. 69 Lomová plocha uvnitř drážky C02, 1 000x zvětšena	56
Obr. 70 Lomová plocha uvnitř drážky C02, 2 000x zvětšena	56
Obr. 71 Lomová plocha uvnitř drážky 2 v C02, 4 000x zvětšena	56
Obr. 72 Lomová plocha uvnitř drážky 2 v C02, 500x zvětšena	56
Obr. 73 Koncentrace napětí v S01	57
Obr. 74 Napětí v S01 před lomem.....	57
Obr. 75 Koncentrace napětí v S02.....	58
Obr. 76 Napětí v S02 před lomem.....	58
Obr. 77 Místo lomu S01	58
Obr. 78 Lom S01	58
Obr. 79 Krček Al v S01	58
Obr. 80 Detail rozhraní Al-Fe S01 v BSE.....	59

Obr. 81 Lomová plocha uvnitř drážky v S01	59
Obr. 82 Místo lomu S02	59
Obr. 83 Lom S02	59
Obr. 84 Místo lomu mimo drážku z místa lomu S02 s oxidy.....	59
Obr. 85 Místo lomu v drážce S02.....	59
Obr. 86 Koncentrace napětí v T01.....	61
Obr. 87 Napětí v T01 před lomem.....	61
Obr. 88 Koncentrace napětí v T02.....	61
Obr. 89 Napětí v T02 před lomem.....	61
Obr. 90 Místo lomu T01	62
Obr. 91 Lom T01	62
Obr. 92 Lomová plocha uvnitř drážky T01	62
Obr. 93 Místo lomu mimo drážku z T01 s oxidy	62
Obr. 94 Místo lomu T02	62
Obr. 95 Místa šíření trhlin v T02	62
Obr. 96 Substrát s mřížkou před stříkáním.....	67
Obr. 97 Připevněná mřížka před cold spray	67
Obr. 98 Substrát s vytvořenými drážkami	67
Obr. 99 Substrát před nanášením železa.....	68
Obr. 100 Hotový vzorek	68
Obr. 101 Podmínky nástřiku CS.....	68
Obr. 102 Prášek hliníku	69
Obr. 103 Prášek železa	69
Obr. 104 Chemická analýza železného prášku	69
Obr. 105 Kolmo ke směru nástřiku, 100x zvětšen nástřik.....	69
Obr. 106 Kolmo ke směru nástřiku, 200x zvětšen nástřik.....	69
Obr. 107 Kolmo ke směru nástřiku, 100x zvětšena drážka	70
Obr. 108 Kolmo ke směru nástřiku, 200x zvětšen detail drážky.....	70
Obr. 109 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšena drážka 1	70
Obr. 110 Rovnoběžně se směrem nástřiku, 100x zvětšena drážka 2	70
Obr. 111 Nečistoty v nástřiku železa.....	71
Obr. 112 Chemická analýza nečistot	71
Obr. 113 Koncentrace napětí v CS -C01	73
Obr. 114 Koncentrace napětí v CS -C02	73
Obr. 115 Místo lomu CS-C01	73
Obr. 116 Místo lomu CS-C02	73
Obr. 117 Lomová plocha rozhraní hliník-železo.....	74
Obr. 118 Rozhraní hliník-železo	74
Obr. 119 Kulaté nečistoty v nástřiku železa	74
Obr. 120 Chemická analýza nečistot	74
Obr. 121 Nečistoty v lomové ploše	75
Obr. 122 Chemická analýza nečistot	75
Obr. 123 Reliéf lomové plochy	75
Obr. 124 Rozlišení materiálů v lomové ploše	75

Obr. 125 Lomová plocha železa	75
Obr. 126 Lomová plocha hliníku.....	75
Obr. 127 Místa měření porozity nástřiku železa: mimo drážku (A), v drážce (B), pásy pórů (C)	78
Obr. 128 Nástřik částic CS z experimentu této práce.....	81
Obr. 129 Nástřik částic CS pod úhlem 45° [33].....	81
Obr. 130 Napětí ve vzorku C z 2. experimentu	82
Obr. 131 Napětí ve vzorku C z 3. experimentu	82
Obr. 132 Lom druhého experimentu	83
Obr. 133 Lom třetího experimentu	83
Obr. 134 Oxidy na lomové ploše 2.experimentu.....	83
Obr. 135 Nečistoty v železe 3.experimentu.....	83

Seznam grafů

Graf 1 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, C geometrie, kolmo	44
Graf 2 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, C geometrie, rovnoběžně.....	44
Graf 3 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, S geometrie, kolmo.....	45
Graf 4 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, S geometrie, rovnoběžně	45
Graf 5 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, T geometrie, kolmo	46
Graf 6 Průběh tvrdosti, čtvercová drážka, T geometrie, rovnoběžně.....	46
Graf 7 Tahová křivka C02	54
Graf 8 Tahové křivky S01 a S02	57
Graf 9 Tahové křivky T01 a T02.....	60
Graf 10 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, C geometrie, kolmo	63
Graf 11 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, C geometrie, rovnoběžně.....	64
Graf 12 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, S geometrie, kolmo.....	64
Graf 13 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, S geometrie, rovnoběžně	65
Graf 14 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, T geometrie, kolmo.....	65
Graf 15 Průběh tvrdosti, lichoběžníková drážka, T geometrie, rovnoběžně.....	66
Graf 16 Tahové křivky pro CS-C01 a CS-C02.....	72
Graf 17 Průběh tvrdosti, CS hliník a CS železo, kolmo	76
Graf 18 Průběh tvrdosti, CS hliník a CS železo, rovnoběžně.....	77
Graf 19 Výsledky tahových zkoušek různých geometrií	85

Seznam tabulek

Tab. 1 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Fe	47
Tab. 2 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Al	47
Tab. 3 Výsledky tahových zkoušek	53
Tab. 4 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Fe	66
Tab. 5 Průměrná tvrdost HV0,2 pro Al	66
Tab. 6 Složení nečistot v procentech	71
Tab. 7 Výsledky tahových zkoušek	74
Tab. 8 Hodnoty z tahových zkoušek vzorků pro CS hliník	76
Tab. 9 Průměrná tvrdost HV0,2 pro CS železo	77
Tab. 10 Průměrná tvrdost HV0,2 pro CS hliník	77
Tab. 11 Hodnoty porozity všech vzorků na 3 místech A-C	79
Tab. 12 Hodnoty porozity všech vzorků	80
Tab. 13 Tabulka tvrdostí pro hliník a železo	84
Tab. 14 Tabulka mechanických vlastností CS hliníku	84
Tab. 15 Tabulka mechanických vlastností hliníkových substrátů [41, 42]	86